

**IB 131-2015 / 53**

**Einfluss lagenvariabler Schäftwinkel  
auf die Verbindungsfestigkeit geklebter  
Faserverbundreparaturen**

Holzhüter, Dirk  
Rossian, Lennart



**Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik  
Braunschweig**

09 / 2015



Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.  
in der Helmholtzgemeinschaft  
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

**IB 131-2015 / 53**

**Einfluss lagenvariabler Schäftwinkel  
auf die Verbindungsfestigkeit geklebter  
Faserverbundreparaturen**

Braunschweig, 09/15

Der Bericht umfasst:

77 Seiten

Institutsleiter:  
Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann

Verfasser:  
Dipl.-Ing. D. Holzhüter



Leiter der Abteilung:  
Prof. Dr.-Ing. C. Hühne





# Inhaltsverzeichnis

Erklärung.....	3
Kurzfassung.....	5
Inhaltsverzeichnis .....	7
Abbildungsverzeichnis .....	11
Tabellenverzeichnis.....	13
Symbolverzeichnis .....	15
1 Einleitung.....	1
1.1 Faserverbundwerkstoffe in der Luftfahrt.....	1
1.2 Aktuelle Entwicklungen bei Reparaturen an Faserverbundstrukturen .....	2
1.3 Aufgabenstellung und Vorgehensweise .....	4
2 Grundlagen der Reparaturen an Faserverbundstrukturen .....	7
2.1 Reparaturen mit Bolzenverbindungen .....	7
2.2 Reparaturen mit Klebverbindungen.....	8
2.2.1 Überlappende Verbindung.....	10
2.2.2 Gestufte Verbindung.....	11
2.2.3 Geschäftete Verbindung .....	11
2.3 Überblick über die untersuchten Geometrien .....	13
2.3.1 Schäftungsverlauf (2D).....	13
2.3.2 Gestaltung der Reparaturstelle (3D).....	17
2.3.3 Form der Zugproben.....	18
2.3.4 Aufbau des Finite-Elemente-Modells.....	20
3 Analytische Spannungsberechnung.....	21
3.1 Zielsetzung.....	21
3.2 Annahmen und Materialkennwerte .....	21
3.3 Vorgehen bei der Berechnung.....	22
3.4 Ergebnisse der Spannungsberechnung .....	23
4 Numerische Simulationen.....	25
4.1 Zielsetzung.....	25

---

4.2	Verwendete Materialkennwerte.....	25
4.3	Vorgehen zur Erstellung des Finite-Elemente-Modells .....	27
4.3.1	2D-Modell des Schäftbereichs.....	27
4.3.2	3D-Modell der gesamten Probe.....	28
4.4	Netzstudie .....	28
4.5	Ergebnisse.....	30
4.5.1	Spannungs-Dehnung-Kurve.....	30
4.5.2	Spannungsverteilung über der Klebfläche .....	31
4.5.3	Spannungsverteilung über der Klebschichtlänge .....	33
4.6	Vergleich mit der analytischen Spannungsberechnung .....	36
5	Fertigung.....	39
5.1	Verwendete Materialien.....	39
5.1.1	Ausgangslaminat .....	39
5.1.2	Reparaturmaterialien.....	39
5.2	Herstellung von Probekörpern zur Qualifizierung der Fertigungsqualität.....	40
5.3	Zugprobenfertigung.....	42
5.3.1	Grundplatten aus dem Ausgangslaminat .....	42
5.3.2	GFK-Doppler zur Einleitung der Prüfkkräfte .....	44
5.3.3	Einbringen der Reparatur.....	45
6	Experimente .....	49
6.1	Zielsetzung und Probenprogramm.....	49
6.2	Versuchsanlage und Messtechnik .....	49
6.2.1	Prüfmaschine und Versuchsaufbau .....	50
6.2.2	Punktueller Messungen mit Dehnungsmessstreifen.....	50
6.2.3	Flächige optische Messungen mit ARAMIS.....	52
6.3	Ergebnisse der Zugversuche .....	52
6.3.1	Festigkeiten der Zugproben.....	52
6.3.2	Versagensbilder der Zugproben .....	55
6.3.3	Gemessene Spannungs-Dehnungs-Kurven an der Prüfmaschine und den DMS .....	57
6.3.4	Mit DMS gemessene Dehnungsverteilung in der Probe .....	61
6.3.5	Mit DMS gemessene Querdehnung .....	62
6.3.6	Mit ARAMIS gemessene Dehnungsverteilung in der Probe.....	63
7	Diskussion .....	67
7.1	Vergleich der experimentell ermittelten Festigkeiten mit der Simulation.....	67
7.2	Ablösung der GFK-Doppler im Zugversuch .....	69
8	Zusammenfassung .....	71

9	Ausblick .....	73
	Literaturverzeichnis .....	75
	Anhang .....	77





# Abbildungsverzeichnis

Verbreitung von Faserverbundwerkstoffen im Flugzeugbau [10] .....	2
Optimierung der Form einer Schäftstelle [13] .....	3
Ansätze zur Optimierung einer Schäftstelle [1] .....	3
Variation des Schäftwinkels in Abhängigkeit vom Lagenaufbau [4] .....	4
Versagensbilder an Bolzenverbindungen [16] .....	7
Geklebte Reparaturverfahren [7] .....	8
Festigkeiten verschiedener geklebter Reparaturverfahren [5] .....	9
Spannungsverteilungen bei verschiedenen Verbindungsmethoden isotroper Fügepartner [3] .....	10
Spannung in einer überlappenden Verbindung [6] .....	10
Versagen einer überlappenden Verklebung durch zusätzliches Biegemoment [11] .....	11
Spannungsverteilung in einer geschäfteten Verbindung isotroper Fügepartner [6] .....	12
Beispielhafte Schubspannungsverteilung in der Klebschicht anisotroper Fügepartner [12] ..	12
Verlauf der Mittellinien der Schäftgeometrien .....	14
Knoten zur Erstellung der Klebschichtgeometrie .....	15
Angenommene zusätzliche Lagen außerhalb des Laminats .....	15
Berechnung der Mittellinie der Klebschicht .....	16
Einseitige Verschiebung der Mittellinie der Klebschicht .....	16
Verschiebung der Knoten an den Laminaträndern .....	17
Skizze der runden Schäftung mit Geometrie V2 .....	18
Geometrien der Zugproben .....	19
Geometrie der GFK-Doppler .....	19
Dehnung der Zugproben ohne Reparaturstelle zur Konfiguration der Doppler .....	20
Schubspannungsverteilung in einer runden Schäftstelle bei einachsiger Zugbelastung .....	23
Spannungs-Dehnungs-Kurve des Filmklebstoffs EA9695 für das elastisch-plastische Materialverhalten .....	26
2D-Rechennetze der konstanten und der variablen Schäftung .....	27
Detailausschnitt des 2D-Rechennetzes in der Umgebung der Klebschicht .....	27
3D-Rechennetz auf der Zuprobe .....	28
Von-Mises-Spannungsverlauf im rechts markierten Schnitt der Klebschicht mit den in Tabelle 4.2 aufgelisteten Netzfeinheiten .....	30
Numerisch bestimmte Spannungs-Dehnungs-Kurven der Zugproben .....	31
Von-Mises-Spannungsverteilung in der Klebschicht bei unterschiedlichen Schäftgeometrien ( $\varepsilon = 0,35 \%$ ) .....	32
Von-Mises-Spannungsverläufe im $0^\circ$ -Schnitt bei verschiedenen Schäftgeometrien ( $\varepsilon = 0,35 \%$ ) .....	33
Von-Mises-Spannungsverteilung über der Klebschichtlänge bei variablem Schäftwinkel (V2) .....	34

Geometrie der Schäftung mit Knickpunkten in den benachbarten Lagen .....	35
Darstellung der Von-Mises-Spannungsspitzen an den Grenzflächen zwischen Klebschicht und Laminat .....	35
Vergleich der numerisch und analytisch berechneten Spannungsverteilungen in der Klebschicht bei konstanter Schäftung.....	37
Vergleich der numerisch und analytisch berechneten Spannungsverteilungen in der Klebschicht bei variabler Schäftung nach Geometrie V2.....	38
Vakuumaufbau zum Zwischenkompaktieren .....	40
Probeschäftungen mit eingelegtem Filmklebstoff und den ersten Reparaturlagen.....	41
Ausschnitt der Schäftung einer Testplatte mit Geometrie V2.....	41
Vorder- und Rückseite des Preforming-Werkzeugs.....	42
Skizze zum Ablauf der Zugprobenfertigung .....	42
Skizze einer Grundplatte für zwei breite Zugproben.....	43
Vakuumaufbau für die Grundplatten [4].....	44
Autoklavzyklus zum Fertigen der Grundplatten [4] .....	44
Geometrien der GFK-Doppler .....	45
Temperaturverlauf zum Aushärten des Reparaturmaterials.....	46
Vakuumaufbau für die Reparaturlagen .....	46
In der Prüfmaschine eingespannte Zugprobe.....	50
Positionen der Dehnungsmessstreifen mit Nummerierung auf der Rückseite der Zugproben .....	51
Positionierung der Kameras für die Messungen mit ARAMIS.....	52
Übersicht über die Festigkeiten der Zugproben .....	53
Versagensbild der Probe V7_01.....	53
Übersicht über die Abweichungen der Festigkeiten von 504,5 MPa .....	54
Versagensbild der Zugprobe K_03 außerhalb der Reparaturstelle .....	55
Schadensbild am Ausgangslaminat der Probe K_01 .....	56
Schadensbild am Reparaturpatch der Probe K_01 .....	56
Versagensbild am Reparaturpatch der Probe V5_02.....	57
Spannungs-Dehnungs-Kurve aus den Daten der Prüfmaschine .....	58
Spannungs-Dehnungs-Kurve gemessen am DMS vor der Reparatur.....	59
Spannungs-Dehnungs-Kurve gemessen am DMS im Patch.....	59
Spannungs-Dehnungs-Kurve gemessen am DMS neben der Reparaturstelle.....	60
Abgelöster GFK-Doppler.....	61
Gemessene Längsdehnungen im Patch und neben der Reparaturstelle.....	61
Mit DMS gemessene Querdehnungen aufgetragen über Längsdehnung.....	62
Mit ARAMIS gemessene Längsdehnung bei zwei Proben mit konstantem und lagenvariablem Schäftwinkel vor Versagen der Probe .....	63
Skizze der Lagenpositionen in der Reparaturstelle .....	64
Mit ARAMIS gemessene Querdehnung bei zwei Proben mit konstantem und lagenvariablem Schäftwinkel vor Versagen der Probe .....	65
Numerisch berechneter Von-Mises-Spannungsverlauf in der Klebschicht beim Versagensschritt im Zugversuch für die konstante und variable Schäftung mit Geometrie V7 ( $\varepsilon = 0,81\%$ ) .....	68
Numerisch bestimmte Dehnungsverteilung in der Probe ohne Reparaturstelle.....	70

## Tabellenverzeichnis

Zugfestigkeit und Steifigkeit verschiedener Faserarten in Faserrichtung [9] .....	1
Übersicht über die Winkel der Schäftgeometrien .....	13
Verwendete Materialkennwerte der UD-Lagen .....	21
Verwendete Materialkennwerte für das lineare Werkstoffverhalten [14] .....	26
Modelle für die Netzstudie .....	29
Übersicht über die Schäftgeometrien der Zugproben .....	49
Übersicht über die Ausrichtung der DMS .....	51



# Symbolverzeichnis

Abkürzung	Variable	Einheit
E	E-Modul	[GPa]
G	Schubmodul	[GPa]
$Q_0$	Matrix der UD-Steifigkeiten	[MPa]
$Q_{45}$	Matrix der reduzierten UD-Steifigkeiten	[MPa]
x	x-Position	[mm]
y	y-Position	[mm]
z	z-Position	[mm]
$\alpha$	Schäftwinkel	[°]
$\beta$	Faserwinkel im Laminat	[°]
$\varepsilon$	Dehnung	[%]
$\nu$	Querkontraktion	[-]
$\sigma$	Spannung	[MPa]
$\tau$	Schubspannung	[MPa]
$\varphi$	Rotationswinkel in der runden Schäftstelle	[°]

Alle Längen sind, soweit nicht anders vermerkt, in mm angegeben.



# 1 Einleitung

In diesem Kapitel wird eine kurze allgemeine Einführung in die Thematik der faserverstärkten Kunststoffe (FVK) gegeben. Darauf aufbauend werden einige Aspekte zum Einsatz dieser Werkstoffe und den dabei auftretenden Herausforderungen dargestellt. Dabei liegt der Schwerpunkt auf den aktuellen Reparaturverfahren und deren Optimierung. Anschließend werden die Aufgabenstellung und das Vorgehen in dieser Arbeit erläutert.

## 1.1 Faserverbundwerkstoffe in der Luftfahrt

Allgemein werden Faserverbundwerkstoffe als Mehrphasen- beziehungsweise Mischwerkstoffe bezeichnet. Diese bestehen typischerweise aus zwei Komponenten, den Fasern und der einbettenden Matrix. In dem Verbund aus Faser und Matrix werden die unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften so kombiniert, dass sie sich ergänzen. Bei dem in dieser Arbeit behandelten Verbundwerkstoff handelt es sich um einen Faserverstärkten Kunststoff (FVK), bei dem Kohlefasern in einer Epoxidmatrix eingebettet sind. Diese Kombination stellt neben Verbunden aus Glas- beziehungsweise Aramidfasern mit einer Epoxidmatrix den am weitest verbreiteten Faserverstärkten Kunststoff dar.

Tabelle 1.1: Zugfestigkeit und Steifigkeit verschiedener Faserarten in Faserrichtung [9]

Werkstoff	Zugfestigkeit [MPa]	E-Modul [GPa]	Dichte $\left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right]$
Glas	3500 - 7000	75 - 125	2,5
Kohle	1400 - 3400	175 - 550	1,8
Aramid	3500 - 4200	130	1,5

Aufgrund ihrer hohen spezifischen Festigkeit und Steifigkeit werden heute im Flugzeugbau vor allem Kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK) eingesetzt. Diese machen bei neuen Entwürfen bis zu 50% der Gesamtmasse der Flugzeugstruktur aus (Abbildung 1.1).

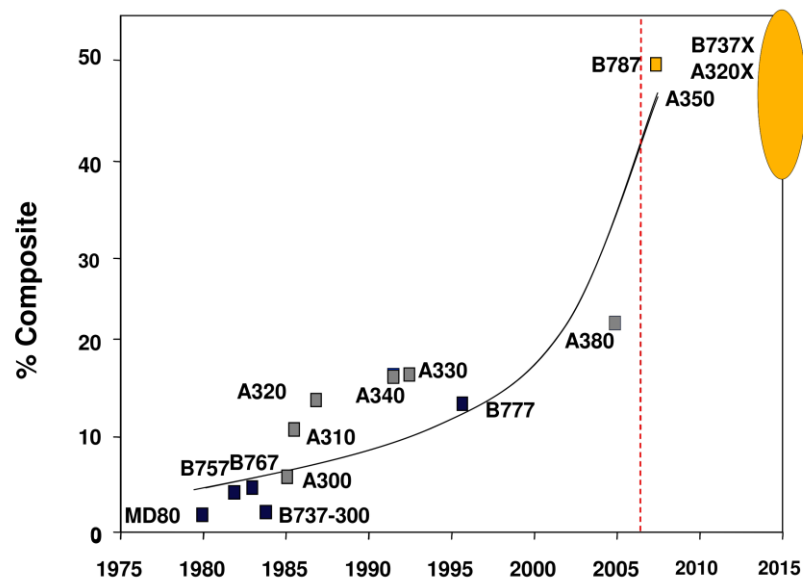


Abbildung 1.1: Verbreitung von Faserverbundwerkstoffen im Flugzeugbau [10]

Mit dem zunehmendem Einsatz von Faserverbundstrukturen werden geeignete Reparaturverfahren benötigt, die die hohen spezifischen Festigkeiten und Steifigkeiten der Bauteile zu erhalten. Im folgenden Abschnitt werden unterschiedliche, aktuelle Ansätze zur Optimierung von Reparaturen an Faserverbundstrukturen vorgestellt.

## 1.2 Aktuelle Entwicklungen bei Reparaturen an Faserverbundstrukturen

Grundsätzlich werden zwei verschiedene Arten von Reparaturverfahren an Leichtbaustrukturen unterschieden:

- 1) Reparaturen mit Bolzenverbindungen
- 2) Reparaturen mit Klebverbindungen

Die Entscheidung darüber, welches Verfahren angewendet wird, hängt von mehreren Faktoren ab. Dabei spielen unter anderem die Ansprüche an die Festigkeit, die Oberflächengüte und die Reparaturzeit sowie die Wandstärke des beschädigten Bauteils entscheidende Rollen. Auf die Vor- und Nachteile der beiden Verfahren sowie die Rahmenbedingungen, unter denen sie eingesetzt werden, wird in Kapitel 2 eingegangen.

Gegenstand der aktuellen Forschung ist vor allem die Optimierung von Schäftreparaturen. Dabei wird das beschädigte Bauteil um die Reparaturstelle in einem definierten Winkel (Schäftwinkel) angeschliffen. Nach dieser Vorbereitung kann in die entstandene Mulde neues Material eingebracht werden. Da die Schäftwinkel in der Größenordnung von wenigen Grad liegen, muss meist ein großer Bereich bearbeitet werden. Dieser muss bereits in der Auslegung der Bauteile berücksichtigt werden. Daher werden verschiedene Ansätze zur Verkleinerung von Reparaturstellen verfolgt. Im Folgenden werden beispielhaft drei verschiedene Möglichkeiten präsentiert.



Einer der Ansätze liegt in der Anpassung der Schäftstelle an den vorhandenen Spannungszustand im Bauteil. So lässt sich, wie in Abbildung 1.2 dargestellt, eine optimale Ausnutzung der Festigkeit der Klebeverbindung zwischen den Fügepartnern erreichen. Bei dieser Methode muss allerdings der Spannungszustand genau bekannt sein. Hier besteht die Gefahr, dass die Reparaturstelle bei nicht berücksichtigten Lastfällen vorzeitig versagt.

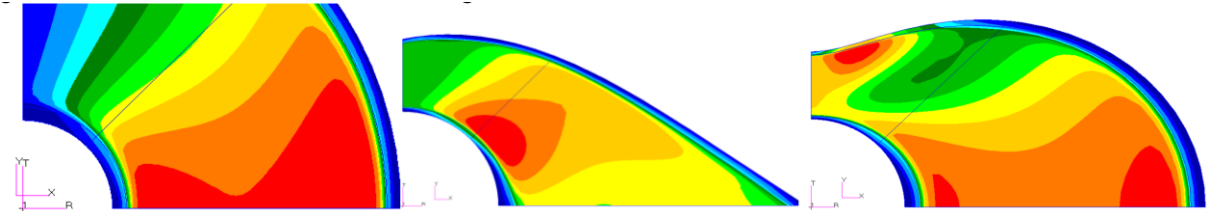
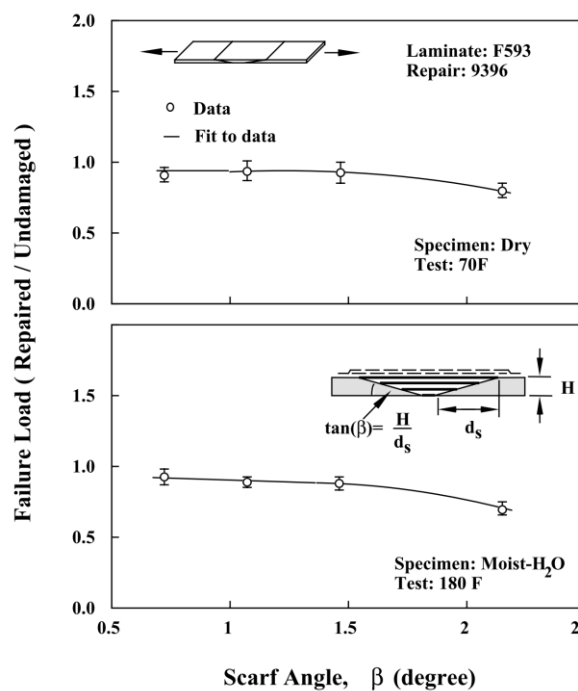
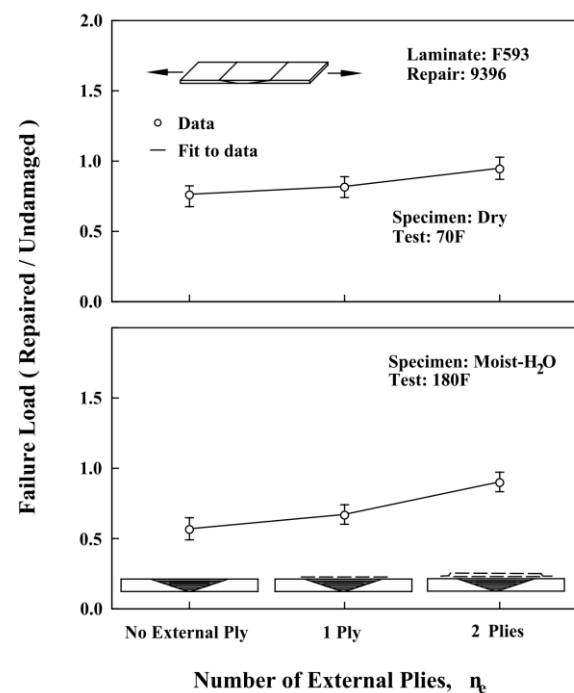


Abbildung 1.2: Optimierung der Form einer Schäftstelle [13]

Eine weitere Möglichkeit, die Reparaturstelle klein zu halten, besteht in der Kombination einer geschäfteten Reparatur mit einem zusätzlichen Reparaturpflaster, welches die Schäftstelle überdeckt. So kann der Schäftwinkel reduziert werden, bis die Festigkeit der Verbindung zwischen Reparatur- und Ausgangsmaterial kleiner ist, als die des Ausgangsmaterials (Abbildung 1.3 (a)). Diese Schwächung wird anschließend mit zusätzlich über der Schäftstelle aufgebrachtem Material ausgeglichen (Abbildung 1.3 (b)).



(a) Variation des Schäftwinkels



(b) Aufbringen einer Verstärkung

Abbildung 1.3: Ansätze zur Optimierung einer Schäftstelle [1]

Das Reparaturverfahren, auf dem diese Arbeit beruht, besteht darin, den Schäftwinkel über der Laminatdicke zu variieren. Dies ist in Abbildung 1.4 skizziert. In einem mehrschichtigen Laminat werden die größten Lasten in den Bereichen übertragen, in denen Fasern parallel zu der Belastungsrichtung liegen. In einer Schäftstelle mit konstantem Winkel treten dort somit Spannungsspitzen in der Klebschicht auf, während die Festigkeit des Klebstoffs in anderen Bereichen nicht ausgenutzt wird. Hier kann der Schäftwinkel vergrößert werden, ohne dass die globale Festigkeit der Reparaturstelle beeinträchtigt wird [4].

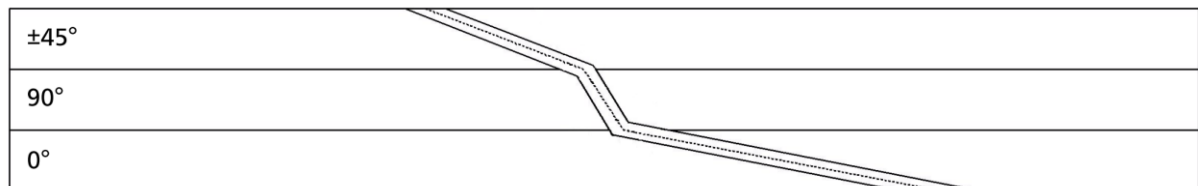


Abbildung 1.4: Variation des Schäftwinkels in Abhängigkeit vom Lagenaufbau [4]

Aufgrund der geringen Lagedicken (meist um 0,1 mm) wird bei der Herstellung einer lagenvariablen Schäftung eine hohe Fertigungsqualität benötigt, die mit einem manuellen Verfahren typischerweise nicht garantiert werden kann. Daher wurde am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) eine Fräse entwickelt, die direkt auf der Oberfläche des beschädigten Bauteils angesetzt wird. Diese vermisst optisch die Oberfläche und kann so die Schäftung mit der geforderten Genauigkeit herstellen [8].

## 1.3 Aufgabenstellung und Vorgehensweise

Das Ziel dieser Arbeit ist, mit numerischen und experimentellen Methoden das Potenzial von lagenvariablen geschäfteten Reparaturen bezüglich der Festigkeitssteigerung gegenüber mit konstantem Winkel geschäfteten Reparaturen zu untersuchen und zu bewerten. Die Untersuchungen finden dabei an Zugproben statt, in die eine Reparaturstelle eingearbeitet wird.

Zu diesem Zweck wird im ersten Schritt eine vereinfachte analytische Berechnung der Spannungsverteilung in runden, geschäfteten Reparaturen mit konstantem und lagenvariablem Schäftwinkel durchgeführt. Daraus können erste Erkenntnisse über die Gestaltung der Geometrie der lagenvariablen Schäftung abgeleitet werden.

Im zweiten Schritt wird für eine numerische Finite-Elemente-Simulation ein Verfahren zur Modellierung der später im Experiment untersuchten Zugproben entwickelt. Mit diesen Finite-Elemente-Modellen werden die Ergebnisse der analytischen Rechnung überprüft und erweitert, da die numerischen Simulationen detailliertere Analysen ermöglichen und nicht durch vereinfachende Annahmen in ihrer Gültigkeit begrenzt sind.

Anschließend werden die experimentell zu untersuchenden Zugproben gefertigt. Dabei werden zuerst Grundkörper hergestellt, in die anschließend eine Reparatur eingebracht wird. Nach der Fertigung werden die Proben mit Sensorik zur Messung der auftretenden Dehnungen ausgestattet und in einer Prüfmaschine auf Zug bis zum Versagen belastet.

Zum Abschluss werden die Ergebnisse der numerischen und der experimentellen Untersuchungen gegenübergestellt und miteinander verglichen. Aus dieser Analyse werden Erkenntnisse zum Verhalten der konstanten und der lagenvariablen Schäftungen abgeleitet und in der abschließenden Diskussion erläutert.



## 2 Grundlagen der Reparaturen an Faserverbundstrukturen

In diesem Kapitel werden die aktuellen Reparaturverfahren an Leichtbaustrukturen vorgestellt und ihre Vor- und Nachteile diskutiert. Dabei wird das anisotrope Materialverhalten von Faserverbundwerkstoffen zunächst nicht berücksichtigt und die Verbindung zweier isotroper Fügepartner betrachtet. Anschließend werden die so gewonnenen Erkenntnisse um das anisotrope Materialverhalten erweitert.

Die Unterteilung der Reparaturverfahren erfolgt nach den Verbindungsformen der Ausgangsstruktur mit dem Reparaturmaterial. Zuerst wird auf die klassische, bei metallischen Strukturen eingesetzte, Bolzenverbindung und anschließend auf verschiedene Möglichkeiten von geklebten Verbindungen eingegangen.

### 2.1 Reparaturen mit Bolzenverbindungen

Die einfachste Möglichkeit zur Herstellung einer Reparatur besteht in dem Aufbringen von bereits vorbereitetem Material, welches über Bolzen mit der Ausgangsstruktur befestigt wird. Dieses Reparaturverfahren hat den Vorteil, dass es schnell durchzuführen ist. Zudem werden bei Bauteilen mit großen Wandstärken, anders als bei geklebten Verbindungen, nur kleine Überlappungsflächen zur Kraftübertragung benötigt [2].

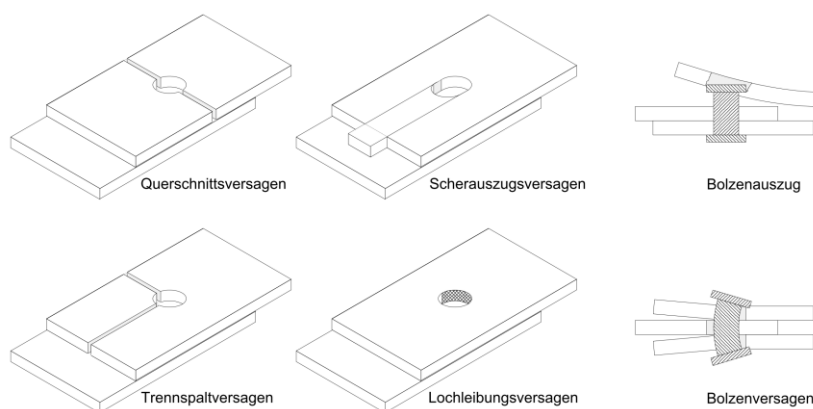


Abbildung 2.1: Versagensbilder an Bolzenverbindungen [16]

Ein großer Nachteil der Reparaturen mit Bolzenverbindungen ist allerdings, dass die Bolzen selbst Fehlstellen im zu reparierenden Bauteil und dem Reparaturmaterial darstellen, was die Festigkeit der gesamten Reparaturstelle herabsetzen kann. Ein Überblick über die

unterschiedlichen Versagensbilder an Bolzenverbindungen ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Daher ist diese Reparaturmethode vor allem an hoch belasteten Strukturen aus Faserverbundmaterialien mit kleinen Wandstärken nur bedingt einsetzbar.

## 2.2 Reparaturen mit Klebverbindungen

Neben den Reparaturen mit Bolzenverbindungen besteht die Möglichkeit der geklebten Verbindungen. Bei diesen gibt es größere Variationsmöglichkeiten in der Gestaltung der Verbindung zwischen dem Reparatur- und dem Ausgangsmaterial. Eine Auswahl davon ist in Abbildung 2.2 abgebildet.

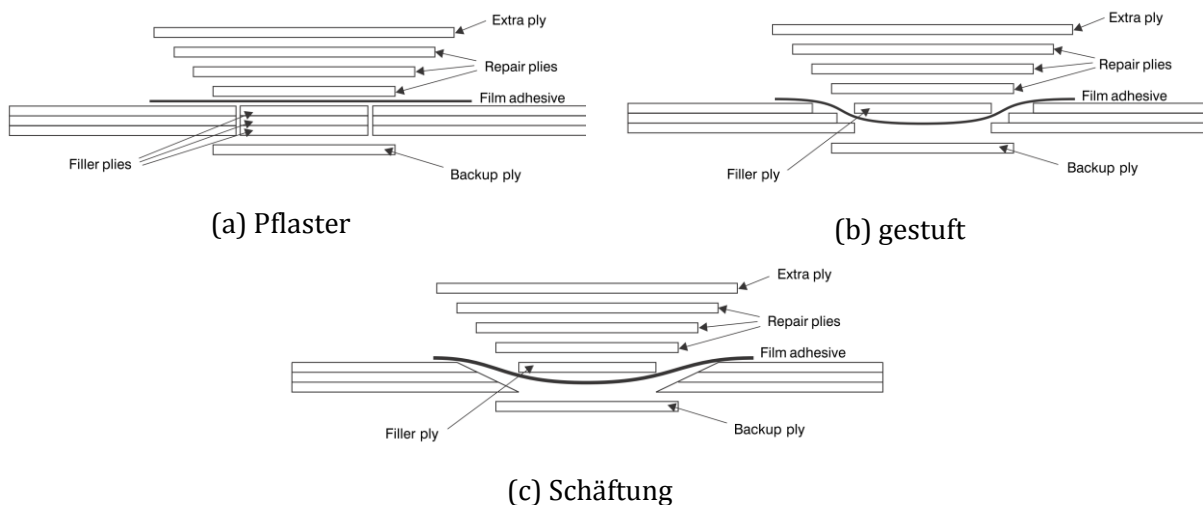


Abbildung 2.2: Geklebte Reparaturverfahren [7]

Abbildung 2.2 (a) zeigt eine Reparatur, bei der die Reparaturlagen außen auf das beschädigte Bauteil aufgebracht werden. Der prinzipielle Aufbau ist somit der gleiche wie bei den bereits vorgestellten Reparaturen mit Bolzenverbindungen. Die geklebte Verbindung hat allerdings den Vorteil, dass keine Fehlstellen erzeugt werden, welche die Festigkeit herabsetzen können. Auf der anderen Seite werden bei der geklebten Reparatur höhere Anforderungen an die Beschaffenheit der Fügeflächen gestellt, was einen erhöhten Arbeitsaufwand bedeutet [2].

In Abbildung 2.2 (b) und (c) sind zwei Verfahren skizziert, bei denen das Reparaturmaterial in das beschädigte Bauteil eingearbeitet wird. Damit kann zum einen die äußere Kontur des Bauteils erhalten werden. Vor allem im Flugzeugbau ist das aufgrund der Anforderungen an die aerodynamischen Eigenschaften der Bauteile von großer Bedeutung. Zum anderen lässt sich mit diesen Reparaturverfahren eine höhere Festigkeit erreichen. In Abbildung 2.3 ist gut zu sehen, dass mit den verschiedenen Verfahren unterschiedliche Festigkeiten erreicht werden. Dabei weisen die Verbindungen mit Überlappungen deutlich geringere Festigkeiten auf als die Verbindungen, bei denen das Reparaturmaterial eingearbeitet wird.

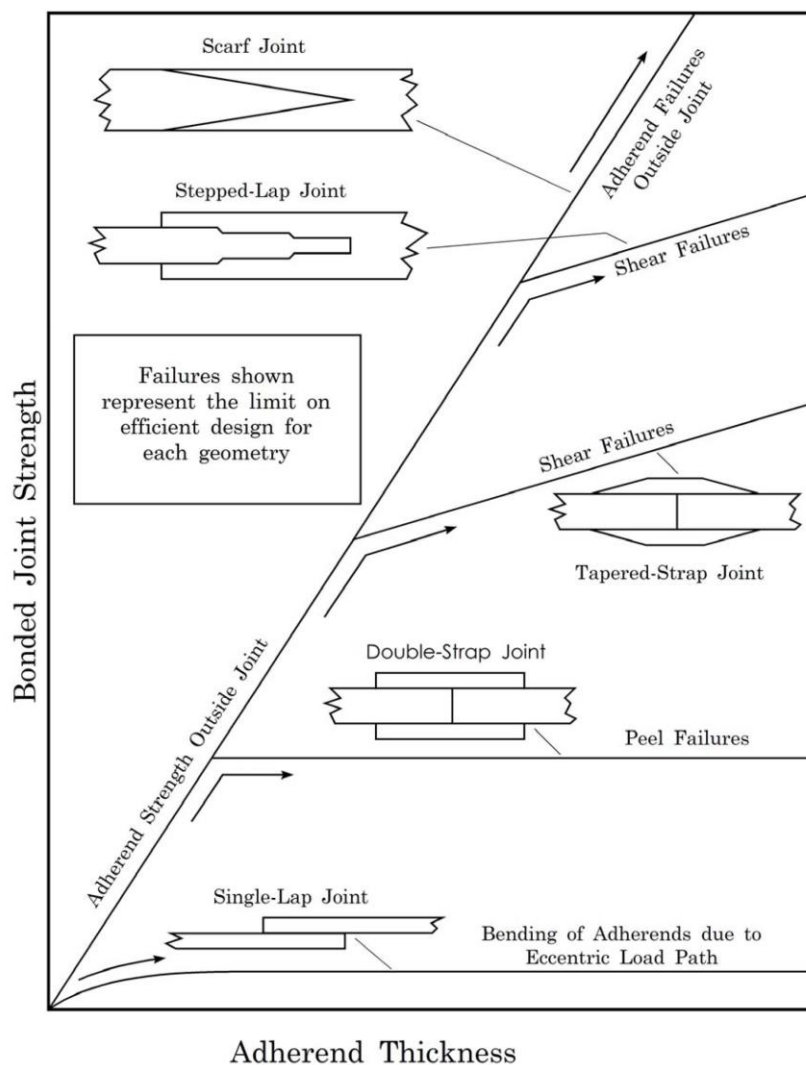


Abbildung 2.3: Festigkeiten verschiedener geklebter Reparaturverfahren [5]

Ein erster Überblick über die Ursache für die unterschiedlichen Festigkeiten der verschiedenen geklebten Verbindungsmethoden ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Beim Vergleich der Spannungsverläufe in den Klebschichten fällt auf, dass sich nur bei der geschäfteten Verbindung eine gleichförmige Belastung einstellt. In den folgenden Abschnitten wird nun detaillierter auf die unterschiedlichen geklebten Verbindungsarten und die dabei auftretenden Versagensursachen eingegangen.

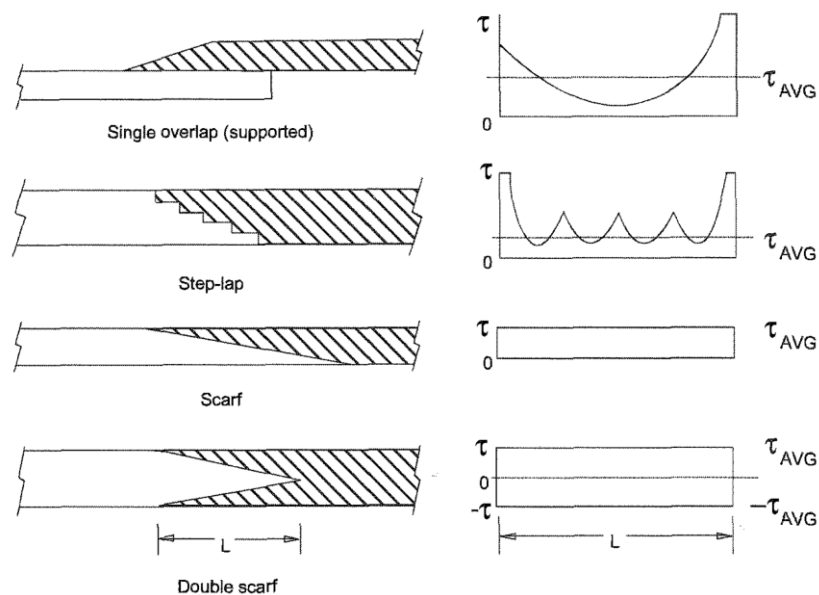


Abbildung 2.4: Spannungsverteilungen bei verschiedenen Verbindungsmethoden isotroper Fügepartner [3]

## 2.2.1 Überlappende Verbindung

Die überlappende Verbindung stellt die einfachste Möglichkeit dar, zwei Körper zu verbinden, hat jedoch einige Nachteile bezüglich der Ausnutzung der Festigkeit des Klebstoffs. Zum einen kommt es, wie in Abbildung 2.5 dargestellt ist, zu unterschiedlichen Dehnungen der Fügepartner an den Rändern der Verbindung. Diese Dehnungsunterschiede führen zu Spannungsspitzen, wodurch der Klebstoff an den Rändern vorzeitig versagen wird. Ein erster Ansatz zur Reduktion dieser Spannungsspitzen ist in Abbildung 2.4 skizziert, wobei einer der Fügepartner mit einem schräg auslaufenden Ende versehen ist. Dies führt zwar aufgrund der reduzierten Steifigkeit zu einer Minderung der Spannungsspitze, kann diese aber nicht vollständig verhindern.

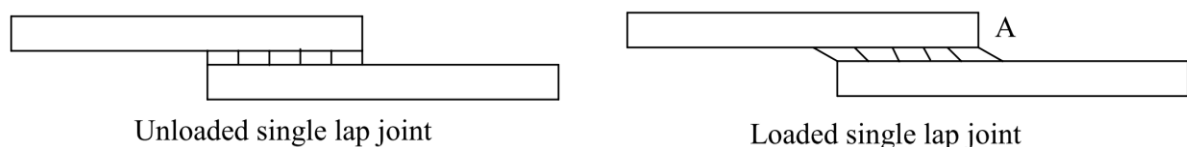


Abbildung 2.5: Spannung in einer überlappenden Verbindung [6]

Ein weiterer Nachteil der einfach überlappenden Verbindung besteht darin, dass die beiden Fügepartner nicht in einer Ebene mit der ursprünglichen Belastungsrichtung verbunden werden. In Abbildung 2.6 ist dargestellt, wie diese Anordnung zu einem zusätzlich auftretenden Biegemoment und somit zu einer schälenden Belastung führt. Diese kann ein Versagen sowohl der Verbindung als auch der Fügepartner hervorrufen.



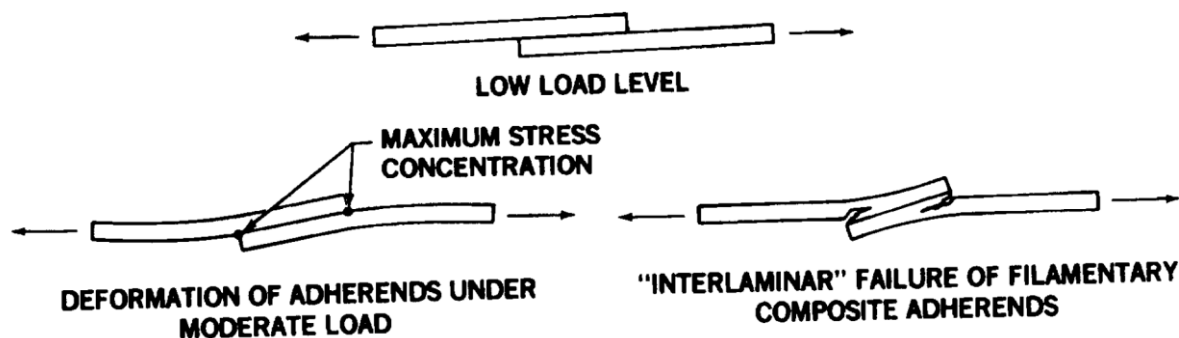


Abbildung 2.6: Versagen einer überlappenden Verklebung durch zusätzliches Biegemoment [11]

Diese zusätzliche Belastung kann durch einen symmetrischen Aufbau vermindert werden. Daher weist eine doppelt überlappende Verbindung eine höhere Festigkeit auf (vgl. Abbildung 2.3). Die Spannungsspitzen an den Rändern der Verbindung werden so allerdings nicht vermieden und treten weiterhin auf.

## 2.2.2 Gestufte Verbindung

Gestufte Verbindungen stellen eine verfeinerte Variante der einfachen überlappenden Verbindung dar. Der Ansatz besteht dabei darin, die in Abbildung 2.6 gezeigte Schwächung der Verbindung durch das zusätzlich auftretende Biegemoment sowie die Spannungsspitzen im Klebstoff durch die unterschiedlichen Dehnungen der Fügepartner herabzusetzen. In Abbildung 2.4 ist gut zu erkennen, dass die großen Spannungsspitzen an den Rändern der Fügestelle abgeschwächt werden. Stattdessen treten nun über die Länge der Klebschicht neue Spannungsüberhöhungen auf, die auf die Unstetigkeit der Grenzflächen zurückzuführen sind. Dabei treten in jeder kleinen Stufe die gleichen Phänomene wie bei der einfachen überlappenden Verbindung auf. Da diese Effekte jedoch mit kleineren Stufen abnehmen, liegt es nahe, die Stufen immer feiner werden zu lassen. Mit diesem Ansatz erreicht man schließlich den Übergang zu einer geschäfteten Verbindung.

## 2.2.3 Geschäftete Verbindung

Im vorherigen Abschnitt konnte erläutert werden, dass sich die Spannungsverteilung in einer geschäfteten Verbindung zweier isotroper Fügepartner aus einer immer feiner gestuften Verbindung entwickeln lässt. Dabei wird schließlich ein Punkt erreicht, an dem die Spannungsverteilung in der Klebschicht homogen wird. Dies wird in Abbildung 2.7 deutlich. Folglich stellt eine geschäftete Verbindung das Optimum für zwei isotrope Fügepartner dar, da der Klebstoff gleichmäßig belastet wird und somit nicht vorzeitig an einem definierten Punkt versagt.

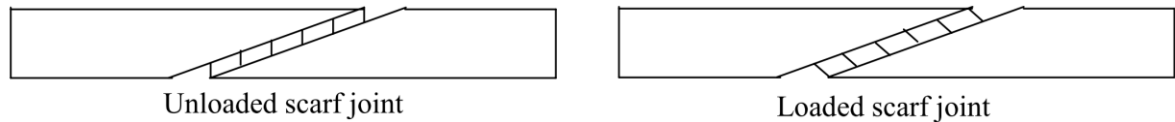


Abbildung 2.7: Spannungsverteilung in einer geschäfteten Verbindung isotroper Fügepartner [6]

In der Einleitung wurde bereits gezeigt, dass Faserverbundwerkstoffe eine immer größere Bedeutung in der Luftfahrtindustrie gewinnen. Da diese Werkstoffe im Allgemeinen ein anisotropes Materialverhalten besitzen, muss die Betrachtung der Verbindung zweier Fügepartner um diesen Aspekt erweitert werden. In Abbildung 2.8 ist zu erkennen, dass die Spannungsverteilung in einer geschäfteten Verbindung von anisotropen Fügepartnern nicht konstant ist. Dies lässt sich auf das Materialverhalten des Faser-Matrix-Verbunds zurückführen. Dieser besitzt in Richtung der Fasern eine deutlich höhere Steifigkeit als unter einem anderen Winkel, in dem die Belastungen von der weicheren Matrix zwischen den Fasern übertragen werden müssen. In einem Verbund aus mehreren Lagen mit unterschiedlichen Faserrichtungen ist die Dehnung des gesamten Laminats für die einzelnen Lagen vorgegeben. Folglich führen die unterschiedlichen Steifigkeiten zu unterschiedlichen Spannungen, die auch in der Verbindung zweier Fügepartner übertragen werden müssen.

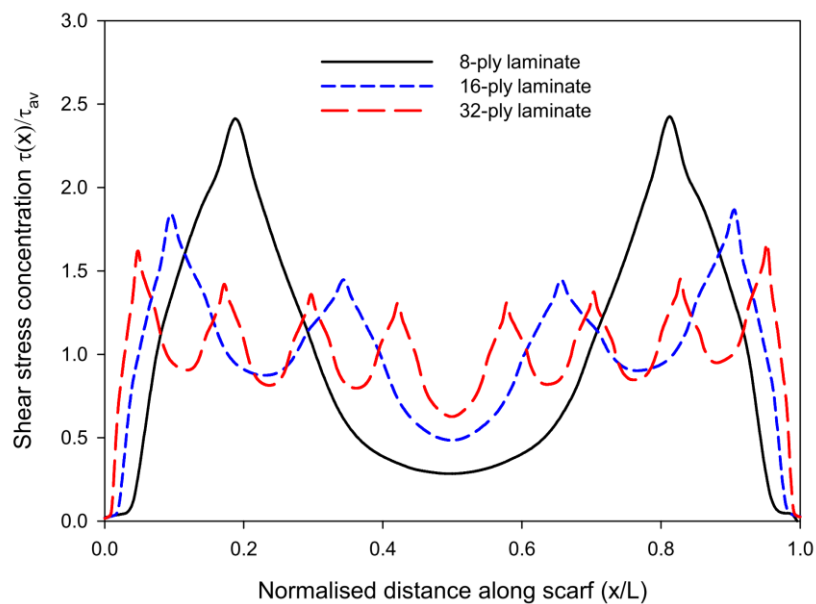


Abbildung 2.8: Beispielhafte Schubspannungsverteilung in der Klebschicht anisotroper Fügepartner [12]

## 2.3 Überblick über die untersuchten Geometrien

In diesem Abschnitt wird auf die Gestaltung der untersuchten Geometrien eingegangen. Dabei werden zuerst die unterschiedlichen zweidimensionalen Schäftgeometrien vorgestellt, da auf deren Einfluss der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt. Anschließend wird die Form der im Zugversuch untersuchten Proben präsentiert und gezeigt, wie diese in der numerischen Simulation modelliert werden. Dabei wird allerdings nur auf die grundlegende Geometrie eingegangen, eine detailliertere Beschreibung der Modellierung findet sich in Kapitel 4.

### 2.3.1 Schäftungsverlauf (2D)

Das Ziel dieser Arbeit ist herauszufinden, wie sich ein lagenvariabler Schäftwinkel auf die Festigkeit einer geschäfteten Reparatur in einer Struktur aus Faserverbundmaterial auswirkt. Für den Fall einer zweidimensionalen Verbindung konnte bereits nachgewiesen werden, dass eine Festigkeitssteigerung möglich ist [4].

Um die dabei gewonnenen Erkenntnisse mit den Ergebnissen der zweidimensionalen Untersuchung vergleichen zu können, wird eine Auswahl der bereits betrachteten Geometrien verwendet. In Tabelle 2.1 ist eine Übersicht über die, den unterschiedlichen Laminatlagen zugeordneten, Schäftwinkeln gegeben. Dabei bildet die Schäftung mit konstantem Winkel die Referenz, an der der Einfluss der variablen Schäftwinkel gemessen wird. Die Geometrien V2 und V5 sind direkt aus [4] übernommen und sollen zum einen die Festigkeitssteigerung bei gleicher Größe der Reparaturstelle und zum anderen die Möglichkeit einer Reduzierung der Größe bei mindestens gleicher Festigkeit zeigen.

Tabelle 2.1: Übersicht über die Winkel der Schäftgeometrien

Geometrie	Schäftwinkel 0°-Lagen	Schäftwinkel $\pm 45^\circ$ -Lagen	Schäftwinkel 90°-Lagen
Konst	2,86	2,86	2,86
V2	1	5,65	21,4
V5	2	5,65	21,4
V7	1,1	4,8	13,5

Die Geometrie V7 hingegen wurde in dieser Arbeit entwickelt, nachdem sich in den numerischen Simulationen gezeigt hat, dass bei den Geometrien V2 und V5 die Änderung des Schäftwinkels zwischen den Laminatlagen zu groß ist. Auf diesen Punkt wird noch genauer in Kapitel 4 eingegangen.

In Abbildung 2.9 sind die Schäftgeometrien graphisch aufgetragen. Gut zu erkennen sind sowohl der Unterschied zwischen der konstanten und den variablen Schäftungen, als auch die Verkleinerung der Schäftlänge mit der Geometrie V5. Darüber hinaus zeigt sich, dass der Unterschied zwischen den variablen Schäftungen V2 und V7 nur gering ist. Später wird allerdings noch deutlich, dass diese kleinen Geometrieänderungen einen großen Einfluss auf das Ergebnis der numerischen Simulation haben.

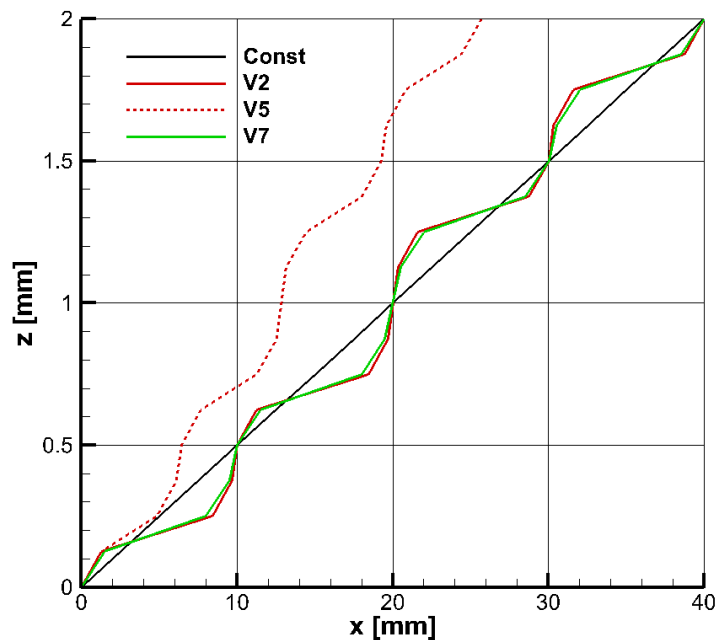


Abbildung 2.9: Verlauf der Mittellinien der Schäftgeometrien

Die Schäftgeometrie ist zunächst über die Mittellinie der Klebschicht definiert, es wird also in der Geometrie der Fügepartner von einer unendlich dünnen Klebschicht ausgegangen. Der nächste Schritt liegt darin, die Dicke der Klebschicht in der Geometrie der Fügepartner zu berücksichtigen. Ziel dabei ist es, über den gesamten Verlauf eine konstante Klebschichtdicke von  $60\text{ }\mu\text{m}$  zu erreichen. Dafür wird von der Mittellinie ausgehend eine Verschiebung anhand der Normalen der Teilbereiche um jeweils die halbe Klebschichtdicke durchgeführt. Um dieses für die verschiedenen Schäftgeometrien schnell durchführen zu können, wurde in Python ein Skript erstellt, welches die Koordinaten der Grenzflächen der Fügepartner berechnet. Die für die Berechnung notwendigen Eingangsgrößen sind:

- 1) Definition des Lagenaufbaus mit den Faserwinkeln ( $0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ$ )
- 2) Dicke der Lagen (hier  $0,125\text{ mm}$ )
- 3) Dicke der Klebschicht (hier  $60\text{ }\mu\text{m}$ )
- 4) Schäftwinkel in Abhängigkeit vom Faserwinkel

Aus diesen Angaben wird zuerst jeder Grenzfläche zwischen zwei Lagen und an den Rändern des Laminats ein Punkt zugeordnet. Diese in Abbildung 2.10 dargestellten Knoten werden später dazu verwendet, zunächst die Mittellinie und anschließend durch Verschiebung die Grenzflächen der Fügepartner zu erstellen.

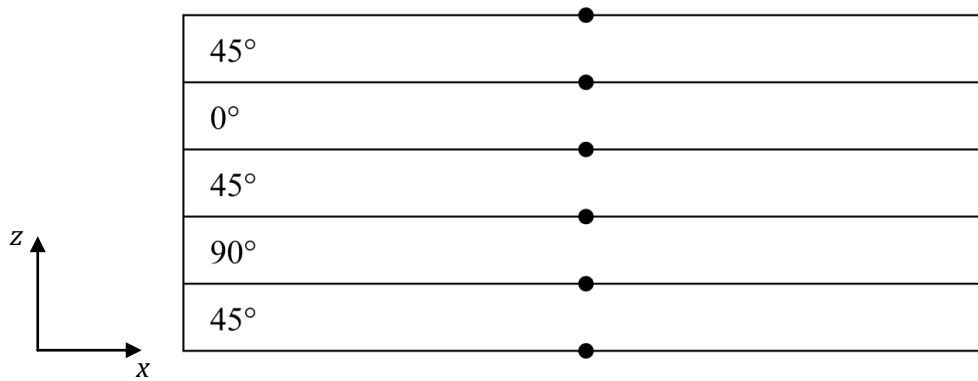


Abbildung 2.10: Knoten zur Erstellung der Klebschichtgeometrie

Mit der Diskretisierung des Laminataufbaus kann anschließend die Berechnung der Geometrien durchgeführt werden. Diese gliedert sich in die folgenden Abschnitte:

- 1) Erstellung eines Arrays, das jedem Knoten den Schäftwinkel der Lage ober- und unterhalb zuordnet. An den Randknoten wird zunächst davon ausgegangen, dass außerhalb des Laminats die gleiche Lage noch einmal vorhanden ist (Abbildung 2.11).

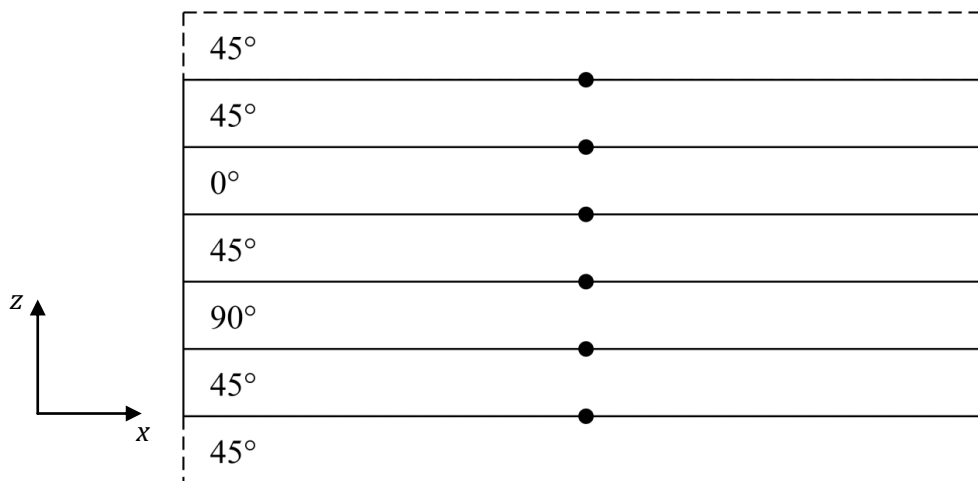


Abbildung 2.11: Angenommene zusätzliche Lagen außerhalb des Laminats

- 2) Berechnung der Mittellinie ausgehend von der Dicke der Lagen und den vorgegebenen Schäftwinkeln (Abbildung 2.12)

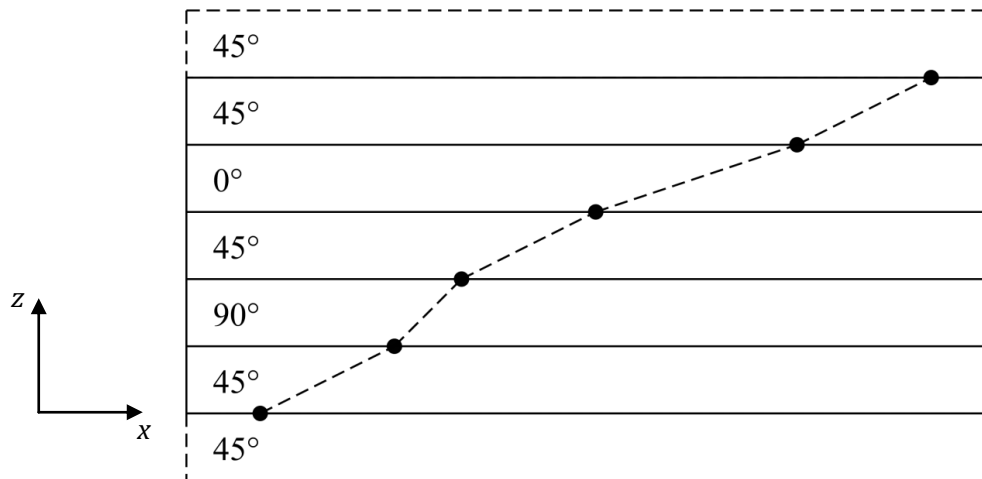


Abbildung 2.12: Berechnung der Mittellinie der Klebschicht

- 3) Berechnung der Verschiebung der Knoten, die sich innerhalb des Laminats befinden. Die Verschiebung der Knoten an den Rändern wird in einem nachfolgenden Schritt gesondert betrachtet.

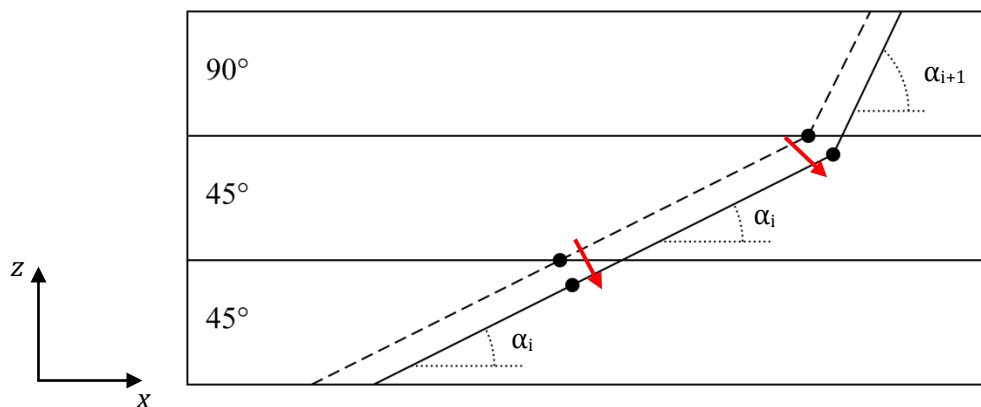


Abbildung 2.13: Einseitige Verschiebung der Mittellinie der Klebschicht

Zur Berechnung der Verschiebung wird zunächst eine Fallunterscheidung anhand der Schäftwinkel getroffen. Im einfacheren Fall sind ober- und unterhalb eines Knotens Lagen mit gleichem Faserwinkel und somit auch gleichem Schäftwinkel vorhanden. In diesem Fall erfolgt die Verschiebung in x- und z-Richtung anhand des Schäftwinkels nach Formel ( 2.1 ).

$$\begin{aligned}\Delta x &= \frac{t_{\text{Klebschicht}}}{2} \sin \alpha_i \\ \Delta z &= \frac{t_{\text{Klebschicht}}}{2} \cos \alpha_i\end{aligned}\quad (2.1)$$

Wenn jedoch ober- und unterhalb eines Knotens Lagen mit unterschiedlichem Schäftwinkel liegen, wird die Berechnung etwas komplizierter. In diesem Fall muss der Knoten entlang der Winkelhalbierenden zwischen den beiden Schäftwinkeln ( $\alpha_i$  und  $\alpha_{i+1}$ ) verschoben werden. Damit ergeben sich die Verschiebungen aus Formel ( 2.2 ).

$$\Delta x = \frac{t_{Klebschicht} \sin\left(\frac{\alpha_i + \alpha_{i+1}}{2}\right)}{2 \cos\left(\frac{\alpha_i - \alpha_{i+1}}{2}\right)}$$

$$\Delta z = \frac{t_{Klebschicht} \cos\left(\frac{\alpha_i + \alpha_{i+1}}{2}\right)}{2 \cos\left(\frac{\alpha_i - \alpha_{i+1}}{2}\right)}$$
( 2.2 )

- 4) Im letzten Schritt werden die neuen Koordinaten der Knoten an den Rändern des Laminats ermittelt. Hier findet keine Verschiebung in Normalenrichtung statt, da dann die Knoten dann nicht mehr auf den Rändern des Laminats liegen würden. Es darf also, wie in Abbildung 2.14 zu sehen ist, keine Verschiebung in z-Richtung stattfinden.

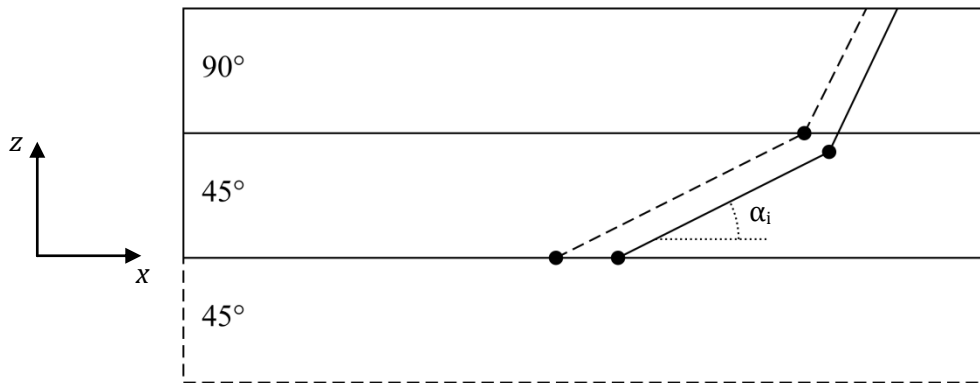


Abbildung 2.14: Verschiebung der Knoten an den Laminaträndern

Die Berechnung der Verschiebung in x-Richtung erfolgt nach Formel ( 2.3 ).

$$\Delta x = \frac{t_{Klebschicht}}{2 \sin \alpha_i}$$
( 2.3 )

Die berechneten Koordinaten der Grenzflächen zwischen Laminat und Klebschicht werden zum Schluss in eine Excel-Tabelle geschrieben, die in Catia eingelesen werden kann. So besteht die Möglichkeit, direkt ein dreidimensionales Konstruktionsmodell der Schäftung zu erstellen, aus welchem ein Fräsprogramm zur Fertigung der Schäftung abgeleitet werden kann.

## 2.3.2 Gestaltung der Reparaturstelle (3D)

Die Erweiterung der 2D-Geometrien auf dreidimensionale Reparaturstellen erfolgt für die Untersuchungen dieser Arbeit über eine Rotation der in Abschnitt 2.3.1 gezeigten Verläufe. Bei einer optimierten Reparaturstelle wird man später den Verlauf der Schäftwinkel auch in Umfangsrichtung variieren, um den komplexen dreidimensionalen Belastungen der Schäftung zu entsprechen. Da in den hier vorgestellten Untersuchungen jedoch nur ein erster Eindruck über das Potenzial der variablen Schäftungen erarbeitet werden soll, wird die Geometrie relativ einfach gehalten.

In Abbildung 2.15 ist beispielhaft eine variable Schäftung mit der Geometrie V2 dargestellt. Der Innendurchmesser der Schäftung von 50 mm ist fest vorgegeben, um für spätere Untersuchungen einen Anhaltspunkt über die Größe der angenommenen Beschädigung des Ausgangslaminats zu haben.

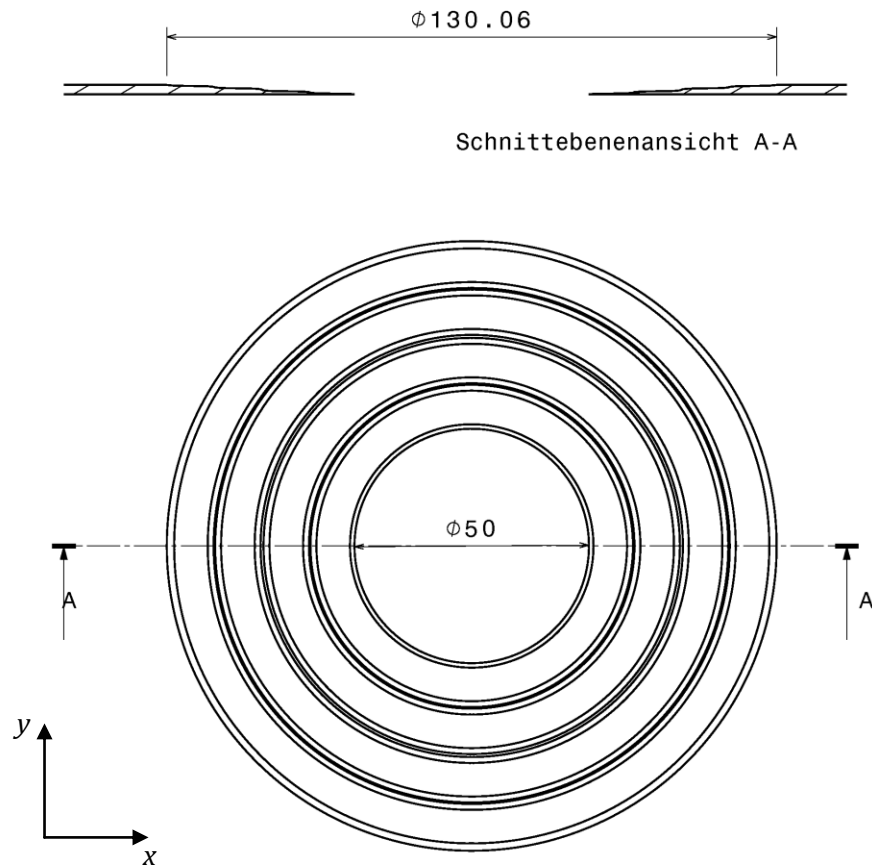


Abbildung 2.15: Skizze der runden Schäftung mit Geometrie V2

### 2.3.3 Form der Zugproben

In Abbildung 2.16 sind die zwei verwendeten Geometrien der Zugproben nebeneinander dargestellt. Das Probenprogramm umfasst zwei unterschiedliche Geometrien, um die Schäftungen mit großer Schäftlänge mit denjenigen mit reduzierter Schäftlänge vergleichen zu können. Verwendet man auch bei den Proben mit reduzierter Schäftlänge die breite Probengeometrie, bleibt um die Reparaturstelle mehr unbeschädigtes Ausgangslaminat stehen. Folglich sinkt der Traganteil der Schäftung und die Proben lassen sich nicht direkt in Bezug auf die Festigkeit der Reparatur vergleichen. Dies wird mit einer insgesamt schmalere Probe kompensiert.



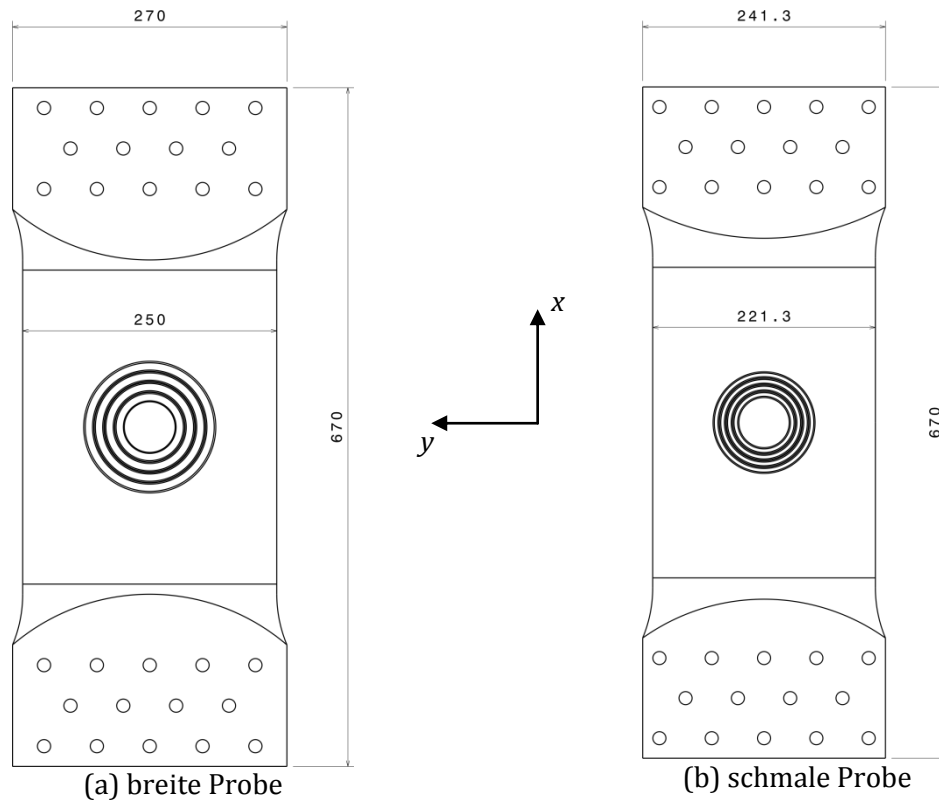


Abbildung 2.16: Geometrien der Zugproben

In Abbildung 2.16 ist außerdem zu sehen, dass die Zugproben eine Taillierung aufweisen. Diese wurde gewählt, damit die Proben im Bereich der Reparatur versagen, auch wenn dieser annähernd die gleiche Festigkeit aufweist wie das Ausgangslaminat. Um dies zu erreichen, werden die Proben, wie in Abbildung 2.17 dargestellt, mit Dopplern aus GFK versehen. Sonst würde es in den Radien der Taillierung zu Spannungserhöhungen kommen, die zu einem vorzeitigen Versagen der Probe führen können. Dazu kommt, dass die Proben in der Prüfmaschine durch Spannbacken über Pressung gehalten werden. Mit den relativ weichen GFK-Dopplern wird dabei die Krafteinleitung in die Probe verbessert.

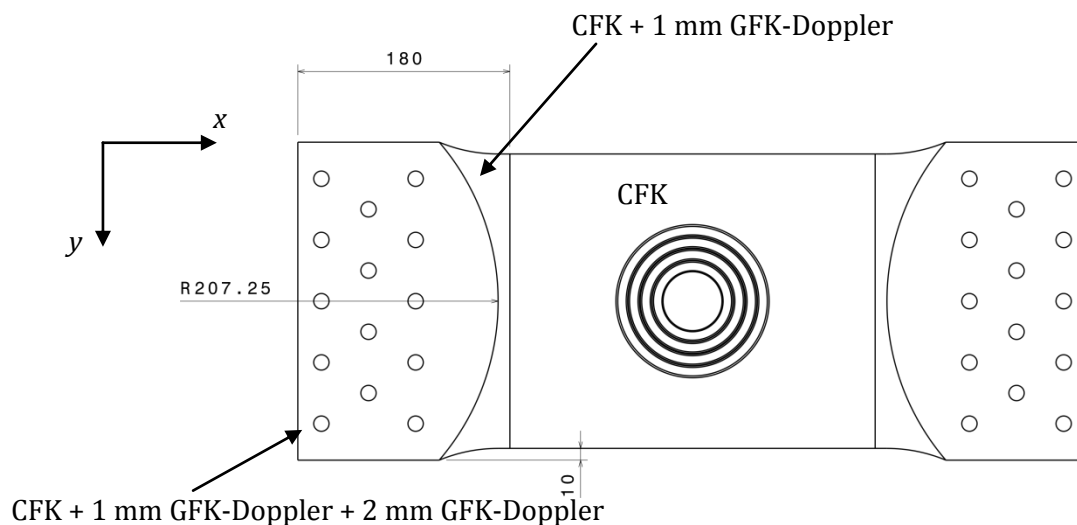


Abbildung 2.17: Geometrie der GFK-Doppler

Dass die Proben mit der Taillierung und den Dopplern im Bereich der Reparatur versagen sollten, zeigt sich in Abbildung 2.18, in der das Ergebnis einer numerischen Voruntersuchung

der Probengeometrie mit den Dopplern dargestellt ist. Deutlich zu erkennen ist, dass die Dehnung der Probe in der Mitte am größten ist und nach außen hin leicht abnimmt. Die Dehnungserhöhung im Radius der Taillierung kann mit den Dopplern deutlich reduziert werden, sodass diese nicht zu einem vorzeitigen Versagen der Probe führen sollte.

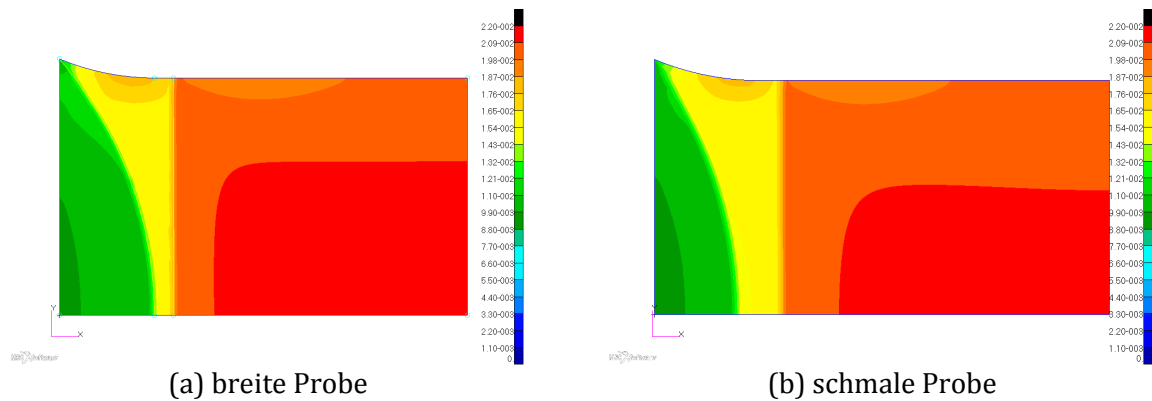


Abbildung 2.18: Dehnung der Zugproben ohne Reparaturstelle zur Konfiguration der Doppler

### 2.3.4 Aufbau des Finite-Elemente-Modells

Bei der Vernetzung des Finite-Elemente-Modells (FE-Modell) der Zugprobe werden im Hinblick auf die reale Probengeometrie einige Vereinfachungen angenommen, die jedoch die zu untersuchende Reparaturstelle nicht betreffen. So wird zum einen der Einspannbereich der Probe in der Prüfmaschine nicht betrachtet, sondern nur der auch im Experiment freie Teil. An die Kanten dieses Bereichs werden in der Simulation direkt die Verschiebungen aufgebracht, es wird also von einer ideal homogenen Krafteinleitung durch die Spannbacken in die Probe ausgegangen. Zum anderen werden die aufgebrachten Doppler nicht modelliert, da in der Simulation die Schwächung der Gesamtprobe in den Radien der Taillierung bei der Analyse des Bereichs der Reparatur keine Rolle spielt.

## 3 Analytische Spannungsberechnung

### 3.1 Zielsetzung

In diesem Kapitel wird eine vereinfachte analytische Berechnung des Spannungszustands in der Klebschicht durchgeführt. Das Ziel ist dabei, einen ersten Eindruck über das Potenzial eines an die Faserrichtung der einzelnen Laminatlagen angepassten Schäftwinkels zu gewinnen.

### 3.2 Annahmen und Materialkennwerte

Zur analytischen Berechnung des Spannungszustands werden einige Vereinfachungen angenommen, die im Folgenden kurz aufgelistet werden.

1. Unendlich dünne Klebschicht
2. Anwendung der klassischen Laminattheorie
3. Idealer einachsiger Spannungszustand
4. Isotropes Verhalten der Einzellagen
5. Ideal lineares Materialverhalten

Diese Annahmen führen zwangsläufig dazu, dass nicht alle Effekte des orthotropen Materialverhaltens in den Ergebnissen wiedergegeben werden. Ziel dieser analytischen Voruntersuchungen ist allerdings auch nicht, den realen Spannungszustand abzubilden, sondern eine Annäherung zu finden. Diese kann auch mit den getroffenen Annahmen dafür genutzt werden, um einen ersten Eindruck über das Potenzial einer Faserverbundreparatur mit einem lagenangepassten Schäftwinkel zu gewinnen.

Ein Überblick über die verwendeten Kennwerte des linearen Werkstoffverhaltens der UD-Lagen findet sich in Tabelle 3.1. Die darin aufgelisteten Werte sind aus [14] entnommen, wo sie aus den Angaben verschiedener Quellen gemittelt wurden.

Tabelle 3.1: Verwendete Materialkennwerte der UD-Lagen

Kennwert	UD-Lage
$E_{11}$	171133 MPa
$E_{22}$	9678 MPa
$\nu_{12}$	0,32
$\nu_{31}$	0,02
$G_{12}$	5450 MPa

Das untersuchte Laminat ist symmetrisch aus einzelnen UD-Lagen mit der Reihenfolge  $[+45^\circ, 0^\circ, -45^\circ, 90^\circ, +45^\circ, 0^\circ, -45^\circ, 90^\circ]_s$  aufgebaut.

### 3.3 Vorgehen bei der Berechnung

Die Berechnung des Spannungszustands wird mit einem Python-Skript durchgeführt, in dem der Laminataufbau, die Schäftwinkel und Dicke der einzelnen Lagen sowie Materialeigenschaften vorgegeben werden. Als Ausgangsgröße für die Berechnung der Spannungen wird direkt die globale Dehnung vorgegeben.

Anschließend werden die folgenden Schritte durchlaufen:

1. Berechnung der Eigenschaften der Einzellagen nach der klassischen Laminattheorie
2. Netzgenerierung für jede Einzellage in Polarkoordinaten
3. Transformation der Polar- in kartesische Koordinaten der Belastung
4. Spannungsberechnung für jede Einzellage

Nach der klassischen Laminattheorie, auf deren Herleitung [9] hier verzichtet wird, müssen die Steifigkeitsmatrizen zum einen für die Lagen mit  $0^\circ$  beziehungsweise  $90^\circ$  Faserwinkel und zum anderen mit  $\pm 45^\circ$  Faserwinkel aus den reduzierten Steifigkeiten berechnet werden. Für die  $0^\circ$ - und  $90^\circ$ -Lagen ergibt sich die Steifigkeitsmatrix direkt aus den Materialkennwerten wie folgt:

$$Q_0 = \begin{pmatrix} \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{31}} & \frac{\nu_{12}E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{31}} & 0 \\ \frac{\nu_{12}E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{31}} & \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Die Berechnung der Steifigkeitsmatrix für die Lagen mit  $\pm 45^\circ$  Faserwinkel hingegen sind etwas aufwendiger, da hier zur Berechnung der reduzierten Steifigkeiten zwei Transformationsmatrizen in das Hauptachsensystem berücksichtigt werden müssen. Diese ergeben sich direkt aus der klassischen Laminattheorie zu:

$$Q_{45} = \begin{pmatrix} 0,5 & 0,5 & -1 \\ 0,5 & 0,5 & 1 \\ 0,5 & -0,5 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0,5 & -0,5 \\ -1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot Q_0 \quad (3.2)$$

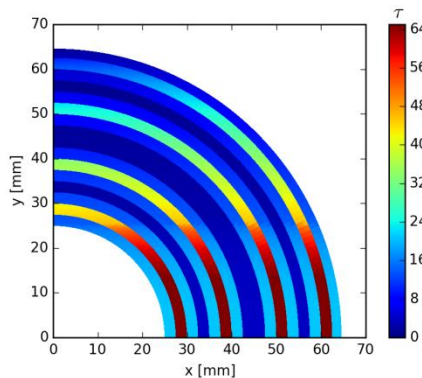
Zur Berechnung der Schubspannungen im Bereich der einzelnen Lagen aus der vorgegebenen globalen Dehnung wird die Formel ( 3.3 )

$$\tau = \frac{1}{2} \varepsilon Q_\beta \sin 2\alpha \quad (3.3)$$

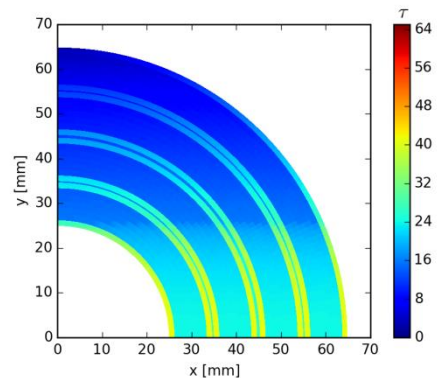
verwendet, in der  $\varepsilon$  für die Dehnung,  $Q_\beta$  für die Steifigkeit der Lage mit dem Faserwinkel  $\beta$ , und  $\alpha$  für den Schäftwinkel stehen. Die Herleitung dieser letzten Formel zur Berechnung der Schubspannung findet sich in [4].

### 3.4 Ergebnisse der Spannungsberechnung

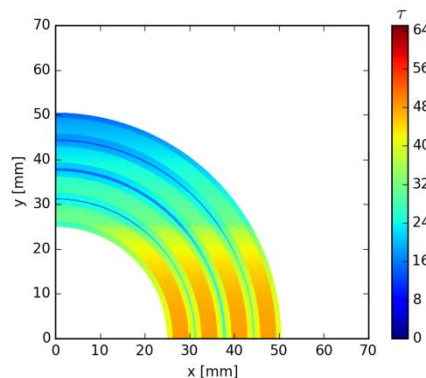
In Abbildung 3.1 sind beispielhaft drei Ergebnisse der analytischen Berechnung dargestellt, die einen ersten Eindruck über die mögliche Festigkeitssteigerung mit einem lagenabhängigen Schäftwinkel nach den Geometrien V2 und V5 vermitteln. So ist in Abbildung 3.1 (a) gut zu erkennen, dass die Spannungen im Bereich der  $0^\circ$ -Lagen deutlich höher liegen als in den benachbarten Lagen. Darüber hinaus wird deutlich, dass bei dem angenommenen idealen einachsigen Spannungszustand der versagenskritische Bereich im Schnitt  $y = 0$  ( $\varphi = 0^\circ$ ) liegt. Dies lässt sich direkt aus der Geometrie der Schäftung ableiten, da durch die Kreisform hier die Schäftlänge in Belastungsrichtung am kürzesten ist.



(a) konstanter Schäftwinkel



(b) lagenabhängiger Schäftwinkel (V2)



(c) lagenabhängiger Schäftwinkel mit reduzierter Schäftlänge (V5)

Abbildung 3.1: Schubspannungsverteilung in einer runden Schäftstelle bei einachsiger Zugbelastung

In Abbildung 3.1 (b) ist zu sehen, wie die Spannung in den  $0^\circ$ -Lagen durch einen flacheren Schäftwinkel herabgesetzt werden kann. Gut zu erkennen ist, dass im versagenskritischen Schnitt die maximalen Spannungen von rund 65 MPa auf etwa 45 MPa reduziert werden. Folglich kann diese Reparaturstelle bei gleicher Größe deutlich höhere Belastungen ertragen. Da bei der Auslegung von Reparaturstellen die Gesamtgröße das entscheidende Kriterium ist, wird in einem zweiten Schritt die Schäftlänge reduziert. Die Gesamtfestigkeit bleibt im Vergleich zu einer konstanten Schäftung dabei erhalten. Dies wird in Abbildung 3.1 (c) deutlich, wo bei einer um 37% reduzierten Schäftlänge die Spannungen noch unter den Spannungsspitzen der konstanten Schäftung bleiben.

Bereits mit dieser vereinfachten analytischen Berechnung der Spannungsverteilung in der Klebschicht konnte ein erster Eindruck über das Optimierungspotenzial von Schäftreparaturen durch Anpassung der Schäftwinkel an die Faserrichtung in den einzelnen Lagen des Laminats gewonnen werden.

## 4 Numerische Simulationen

In diesem Kapitel werden die Grundzüge der durchgeführten numerischen Simulationen vorgestellt und deren Ergebnisse präsentiert.

### 4.1 Zielsetzung

Die numerischen Untersuchungen des Verhaltens der Zugproben mit geschäfteten Reparaturen sollen zunächst eine detailliertere theoretische Beurteilung des Einflusses der Schäftgeometrie auf die Spannungsverteilung in der Klebschicht ermöglichen als die analytischen Berechnungen. Dies wird zum einen durch die Berücksichtigung der tatsächlichen Klebschichtdicke und der Probengeometrie und zum anderen durch die Abbildung des orthotropen Materialverhaltens im Laminat sowie des elastisch-plastischen Verhaltens des Klebstoffs erreicht.

Darüber hinaus werden von der Simulation Daten zur späteren Diskussion der Ergebnisse der experimentellen Zugversuche in Kapitel 7 bereitgestellt.

### 4.2 Verwendete Materialkennwerte

Im Vergleich zu der analytischen Spannungsberechnung werden bei der numerischen Simulation detailliertere Materialkennwerte benötigt. Zum einen muss das Verhalten des Klebstoffs im linearen und elastisch-plastischen Bereich abgebildet werden und zum anderen die Orthotropie der UD-Lagen. In Tabelle 4.1 sind die Materialkennwerte der UD-Lagen und des Klebstoffs für den Bereich des linearen Werkstoffverhaltens aufgelistet.

Tabelle 4.1: Verwendete Materialkennwerte für das lineare Werkstoffverhalten [14]

Kennwert	UD-Lage (8552   33%   134   IM7 12K)	Filmklebstoff Hysol EA 9695
E	-	2400 MPa
$\nu$	-	0,361
E <sub>11</sub>	171133 MPa	-
E <sub>22</sub>	9678 MPa	-
E <sub>33</sub>	9678 MPa	-
$\nu_{12}$	0,32	-
$\nu_{23}$	0,32	-
$\nu_{31}$	0,02	-
G <sub>12</sub>	5450 MPa	-
G <sub>23</sub>	3458 MPa	-
G <sub>31</sub>	5450 MPa	-

Bei den UD-Lagen und damit auch bei dem daraus aufgebauten Laminat mit der symmetrischen Lagenfolge  $[+45^\circ, 0^\circ, -45^\circ, 90^\circ, +45^\circ, 0^\circ, -45^\circ, 90^\circ]_s$  wird von einem ideal elastischen Verhalten bis zum Bruch ausgegangen. Daher ist die Modellierung eines plastischen Verhaltens nicht notwendig. Im Gegensatz dazu muss für den Klebstoff das ausgeprägte elastisch-plastische Werkstoffverhalten abgebildet werden. In Abbildung 4.1 ist die in Patran als Tabelle vorgegebene von-Mises-Spannungs-Dehnungs-Kurve aufgetragen. Diese wurde in Zugversuchen in [14] ermittelt. Die Bruchdehnung im Versuch liegt dabei allerdings niedriger als der abgebildete Bereich bis 10 %. Dies ist notwendig, da bei der numerischen Simulation kein Bruch des Klebstoffs berücksichtigt und von dem letzten angegebenen Bereich des Spannungs-Dehnungs-Verlaufs extrapoliert wird.

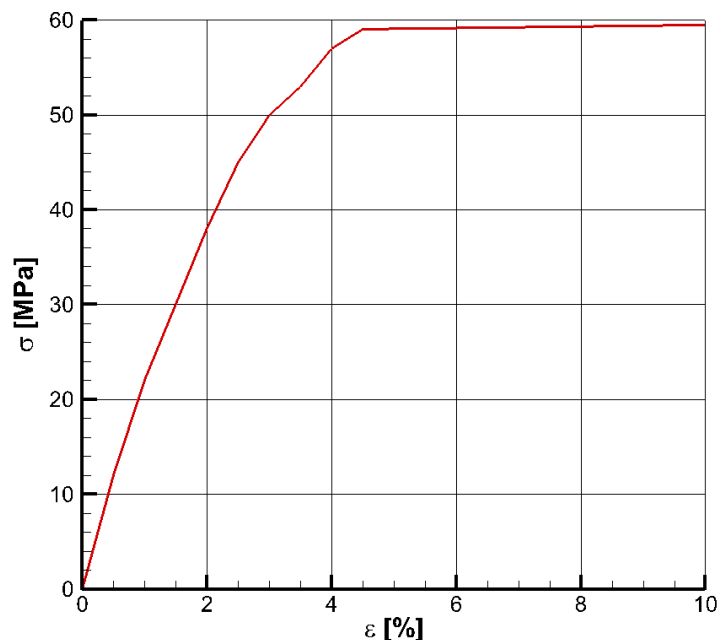


Abbildung 4.1: Spannungs-Dehnungs-Kurve des Filmklebstoffs EA9695 für das elastisch-plastische Materialverhalten

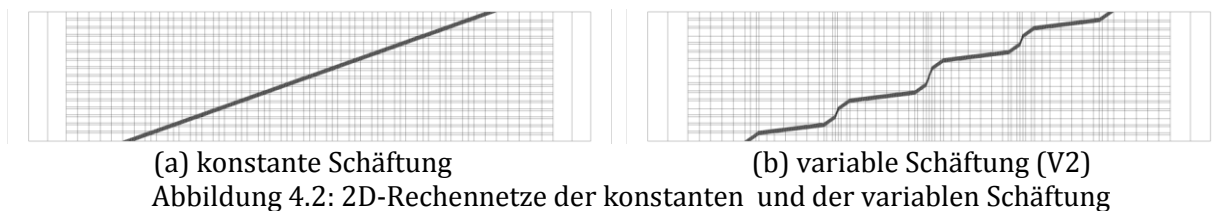


## 4.3 Vorgehen zur Erstellung des Finite-Elemente-Modells

In diesem Abschnitt wird das prinzipielle Vorgehen zur Erstellung eines dreidimensionalen Finite-Elemente-Modells (FE-Modell) vorgestellt. Dieses wird in mehreren Schritten automatisiert über Session-Files direkt in Patran durchgeführt. Eine detailliertere Erläuterung der einzelnen Schritte findet sich in der Dokumentation zur Simulation, die dem Anhang beigelegt ist.

### 4.3.1 2D-Modell des Schäftbereichs

Die Grundlage zur Erstellung eines dreidimensionalen FE-Modells der Zugprobe mit Reparaturstelle bildet ein zweidimensionales Modell der Schäftstelle, welches bereits in vorangegangenen Arbeiten verwendet wurde. Wie in Abbildung 4.2 (a) und (b) zu erkennen ist, besteht das Rechenmodell aus verschiedenen Bereichen. Dies ist notwendig, da in der Umgebungsstruktur, dem Nahbereich der Schäftung und der Klebschicht unterschiedliche Anforderungen an die Auflösung und somit an die Netzfeinheit gestellt werden.



Das Laminat der Umgebungsstruktur wird nur mit einem Element über der gesamten Dicke modelliert. Das ist möglich, da diesem direkt die Eigenschaften eines Mehrschichtlaminats aus Einzellagen mit orthotropem Materialverhalten zugewiesen werden kann. Darüber hinaus ist es nicht nötig, die detaillierte Spannungsverteilung über der gesamten Probe zu kennen. Entscheidend ist, dass die Lasten der Randbedingungen korrekt über den Probenkörper in die Reparaturstelle eingeleitet werden. In der unmittelbaren Nähe der Schäftung wird dann von der Beschreibung mit einem Element über der Probendicke zu einer Modellierung der Einzellagen übergegangen. Der Übergang zwischen diesen Bereichen unterschiedlicher Auflösung geschieht mittels Kontaktbedingungen.

In Abbildung 4.3 ist dargestellt, dass die Klebschicht noch einmal deutlich feiner modelliert wird als die Lagen des Laminats. Die Auswirkungen dieser feinen Auflösung auf die Ergebnisse der Simulation werden im folgenden Abschnitt 4.4 diskutiert. Wie zuvor findet die Anbindung der Bereiche unterschiedlicher Auflösung über Kontaktbedingungen statt.

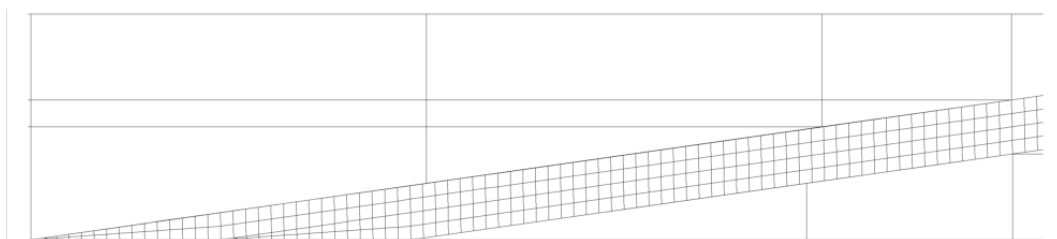


Abbildung 4.3: Detailausschnitt des 2D-Rechennetzes in der Umgebung der Klebschicht

### 4.3.2 3D-Modell der gesamten Probe

Aus dem im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten zweidimensionalen Modell der Reparaturstelle wird mittels einer Rotationsfunktion das dreidimensionale Modell des Schäftbereichs erstellt. Dabei ist zu beachten, dass so ausschließlich kreisförmige Schäftungen abgebildet werden können, die in allen radialen Schnitten das gleiche Profil haben. Für spätere Untersuchungen von komplexeren dreidimensionalen Profilen muss somit ein anderer Ansatz gewählt werden.

Um die Reparaturstelle herum wird anschließend die Geometrie der Zugprobe erzeugt und vernetzt. Das gesamte 3D-Rechennetz mit den Bereichen unterschiedlicher Netzfeinheit ist gut in Abbildung 4.4 zu sehen.

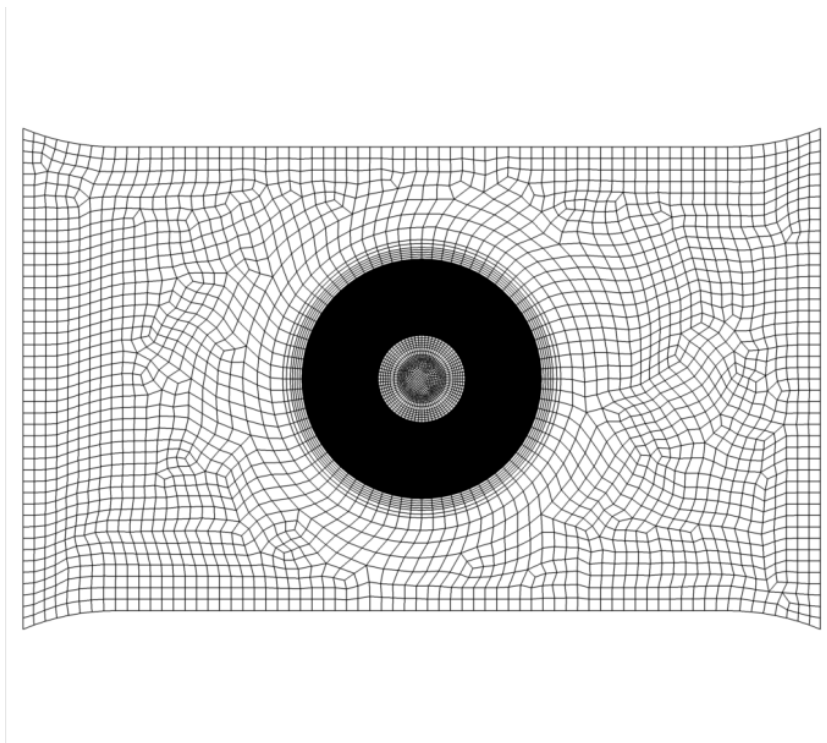


Abbildung 4.4: 3D-Rechennetz auf der Zugprobe

## 4.4 Netzstudie

Bevor mit der Untersuchung des Einflusses eines lagenvariablen Schäftwinkels auf die Spannungsverteilung in der Klebschicht begonnen werden kann, muss geklärt werden, wie sich unterschiedliche Netzfeinheiten auf die Ergebnisse der Simulation auswirken. Hierzu wurden an dem Modell mit konstanter Schäftung nacheinander die Netzfeinheiten in den unterschiedlichen Bereichen angepasst. Eine Übersicht der Parameter findet sich in Tabelle 4.2.

Tabelle 4.2: Modelle für die Netzstudie

Modell	Elemente pro Lage [-]	Elemente in Klebschichtdicke [-]	Elementlänge in Klebschicht [mm]	Elemente in Umfangsrichtung [-]
Konst_U76	1	4	0,125	76
Konst_U100	1	4	0,125	100
Konst_U150	1	4	0,125	150
Konst_L2	2	4	0,125	76
Konst_L3	3	4	0,125	76
Konst_K2	1	2	0,125	76
Konst_K6	1	6	0,125	76
Konst_Kl4	1	4	0,04	76
Konst_Kl6	1	4	0,0625	76
Konst_Kl8	1	4	0,0833	76

Begonnen wurde mit der Variation der Anzahl der Elemente in Umfangsrichtung der runden Schäftung, da bei den anderen Parametern auf Erkenntnisse aus vorangegangenen Arbeiten zurückgegriffen werden konnte [4]. Dabei stellte sich heraus, dass eine Vernetzung mit mehr als 76 Elementen in Umfangsrichtung nicht sinnvoll durchgeführt werden kann, da die benötigte Rechenzeit stark ansteigt. Für eine Rechnung mit 76 Elementen werden knapp 3 Stunden und mit 100 Elementen bereits 20 Stunden benötigt. Bei 150 Elementen hingegen wurde die Rechnung aufgrund der Größe des Modells abgebrochen.

Ähnliches zeigt sich auch bei der Wahl der Vernetzung über die Einzellagen des Laminats. Dabei wurden die Rechnungen mit 2 beziehungsweise 3 Elementen über der Lagendicke abgebrochen.

Die Variation der Elementlängen in Längs- und Querrichtung der Klebschicht hingegen hat nur einen kleinen Einfluss auf die Rechenzeit. Bei den untersuchten Werten lag die benötigte Zeit immer zwischen 2 und 3 Stunden. Hier ergeben sich somit keine Einschränkungen bei der Wahl der Netzfeinheit.

Die Rechenzeit ist allerdings nur ein Kriterium zur Wahl der Netzfeinheiten in den unterschiedlichen Bereichen des Modells. Wichtiger ist, dass das Verhalten des Modells unter Belastung richtig wiedergegeben wird und die Auflösung fein genug ist, um alle wichtigen Details abzubilden. In Abbildung 4.5 sind die mit den in Tabelle 4.2 aufgelisteten Modellen berechneten Spannungsverläufe in der Klebschicht aufgetragen. Diese werden zur Beurteilung des Einflusses der Netzfeinheit genommen, da sie im Bereich der feinsten Auflösung berechnet werden. Wenn sich das Verhalten in den Modellbereichen mit gröberer Auflösung ändert, wird sich das auch in der Klebschicht zeigen.

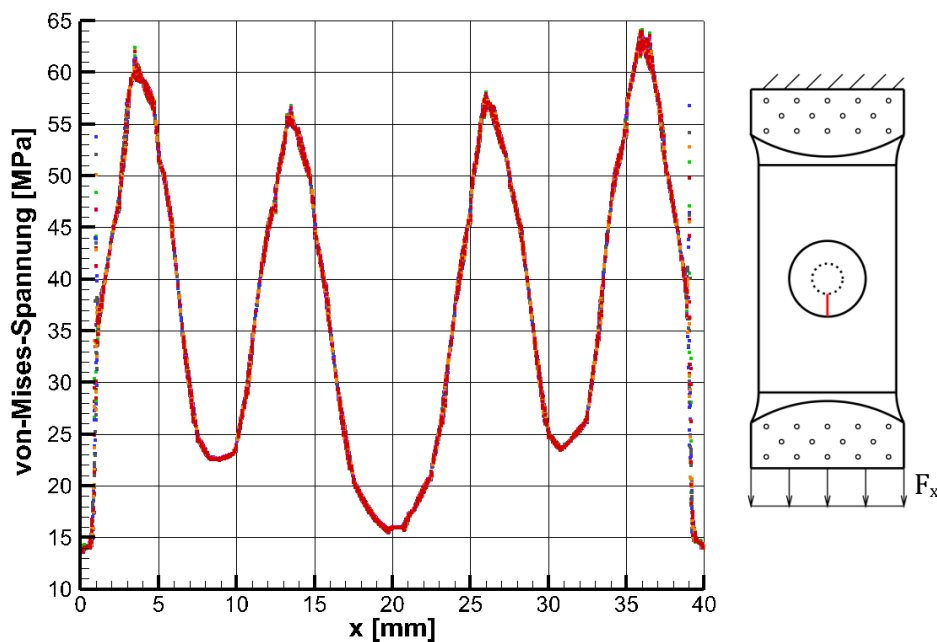


Abbildung 4.5: Von-Mises-Spannungsverlauf im rechts markierten Schnitt der Klebschicht mit den in Tabelle 4.2 aufgelisteten Netzfeinheiten

Dabei zeigt sich, dass die unterschiedlichen Netzfeinheiten keinen wesentlichen Einfluss auf die berechneten Spannungsverläufe haben. Auch hier ergeben sich keine Einschränkungen in der Wahl der Netzparameter. Da sich die Rechenzeit mit den feineren Netzen in der Klebschicht nur unwesentlich verlängert, wurden für die Simulationen der Geometrien mit lagenvariabler Schäftgeometrie die Parameter des Modells Konst\_Kl\_4 gewählt.

## 4.5 Ergebnisse

Nachdem in den vorherigen Abschnitten verschiedene Aspekte zur Erstellung und Qualifizierung des FE-Modells der zu untersuchenden Reparaturprobe dargestellt wurden, soll nun auf die Ergebnisse der Simulationen eingegangen werden. Simuliert wurde eine maximale Streckung der Probe um 5 mm, was einer Gesamtdehnung von 1,16 % entspricht. Zur Auswertung des Verhaltens der Probe bei unterschiedlichen Gesamtdehnungen wurde die Streckung in 10 %-Schritten bis auf die maximalen 5 mm erhöht. In den folgenden Abschnitten wird auf den Spannungszustand der Probe bei 30 % der maximalen Streckung eingegangen, die einer globalen Dehnung von 0,35 % entspricht. Bei dieser Belastung liegen alle Komponenten der Probe im Bereich des linearen Werkstoffverhaltens.

### 4.5.1 Spannungs-Dehnung-Kurve

Bevor in den folgenden Abschnitten auf das Spannungsfeld in der Klebschicht eingegangen wird, soll hier zunächst die numerisch bestimmte Spannungs-Dehnungs-Kurve der gesamten Probe betrachtet werden.

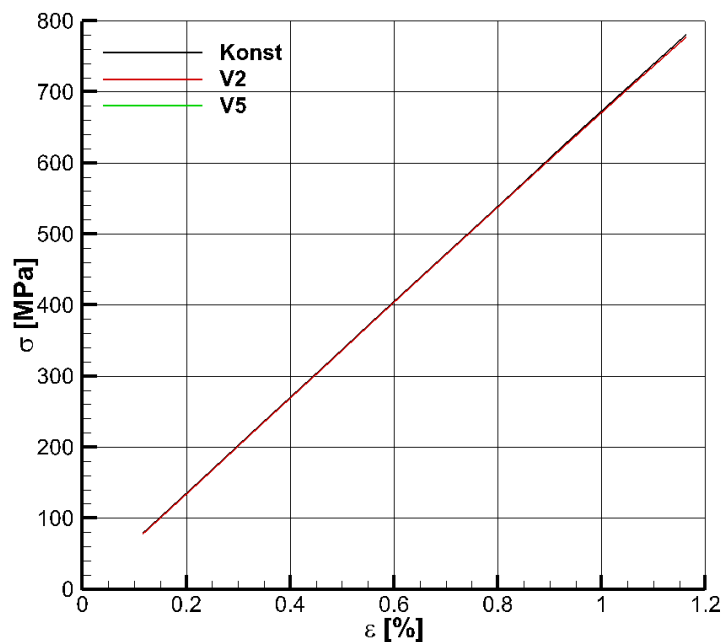


Abbildung 4.6: Numerisch bestimmte Spannungs-Dehnungs-Kurven der Zugproben

In Abbildung 4.6 ist gut zu sehen, dass das globale Verhalten der Zugprobe bei allen Geometrien von dem linearen Materialverhalten des Laminats bestimmt wird. Dass sich das elastisch-plastische Verhalten des Klebstoffs hier nicht zeigt, lässt sich einfach anhand der Geometrie erklären. Die Klebschicht hat eine nominelle Dicke von 60  $\mu\text{m}$  und eine maximale Dehnung von unter 10 %. Die auftretende Längenänderung beträgt somit weniger als 6  $\mu\text{m}$ , was bei der Gesamtlänge der Probe von 430 mm nicht erkennbar ist.

#### 4.5.2 Spannungsverteilung über der Klebfläche

Als erste detaillierte Analyse wird auf die flächige Spannungsverteilung in der Klebschicht zwischen dem Ausgangs- und dem Reparaturmaterial eingegangen. Hierbei sollen erste Erkenntnisse über den Einfluss der Schäftgeometrie auf die Spannungen gewonnen werden.

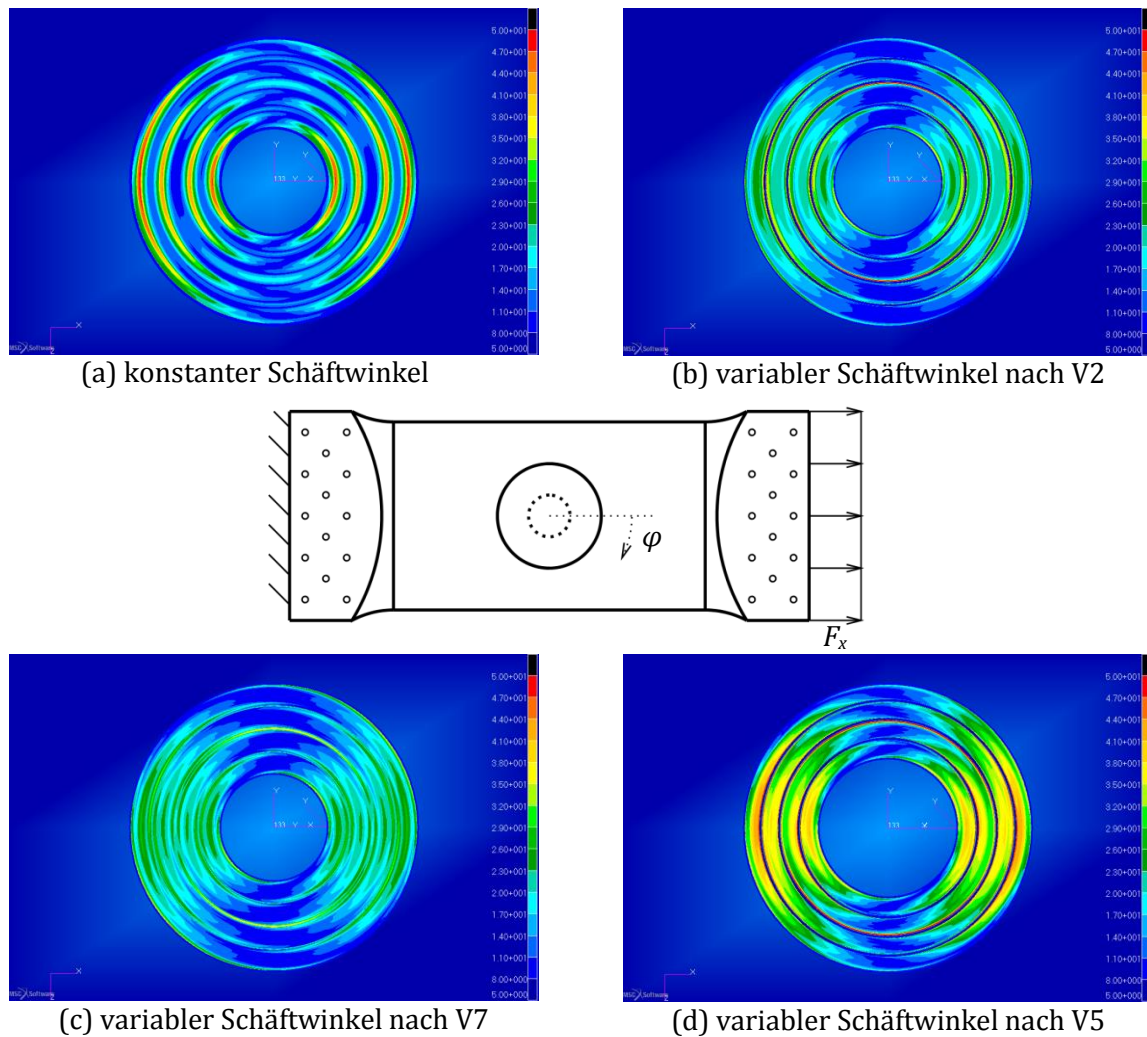


Abbildung 4.7: Von-Mises-Spannungsverteilung in der Klebschicht bei unterschiedlichen Schäftgeometrien ( $\varepsilon = 0,35 \%$ )

In Abbildung 4.7 werden die Spannungsverteilungen in der Klebschicht bei einer globalen Dehnung der Probe von  $0,35 \%$  für unterschiedliche Schäftgeometrien dargestellt. Abbildung 4.7 (a) zeigt den Fall einer konstanten Schäftung. Es ist gut zu erkennen, dass die Bereiche mit den  $0^\circ$ -Lagen eine deutlich erhöhte Spannung aufweisen und der versagenskritische Bereich bei  $\varphi = 0^\circ$  bzw.  $180^\circ$  liegt.

Abbildung 4.7 (b) zeigt die Spannungsverteilung bei einem lagenvariablen Schäftwinkel mit der Geometrie V2. Bei gleicher globaler Schäftlänge werden die Spannungsspitzen deutlich reduziert. Insgesamt können die Spannungsspitzen in der numerischen Simulation um knapp  $50 \%$  (etwa  $50 \text{ MPa}$  auf  $26 \text{ MPa}$ ) verringert werden. Dafür treten im Bereich des Übergangs zwischen 2 benachbarten Lagen Spannungserhöhungen auf. Detaillierter wird auf diese Spannungsspitzen noch im folgenden Abschnitt eingegangen, in dem der Spannungsverlauf über dem versagenskritischen Schnitt ( $\varphi = 0^\circ$ ) zusammen mit der Schäftgeometrie aufgetragen wird.

Um einschätzen zu können, ob diese Spannungsspitzen nur auf numerische Effekte zurückzuführen sind, wurde die Schäftgeometrie V7 erstellt. In Abbildung 4.7 (c) ist gut zu erkennen, dass die  $\pm 45^\circ$ - und  $90^\circ$ -Lagen etwas stärker belastet werden, dafür aber die Spannungsspitzen an den Lagenübergängen vermieden werden. Auch hier folgt im nächsten Abschnitt noch eine detailliertere Analyse. In den angestrebten Zugversuchen soll dann gezeigt werden, welche der beiden Geometrien die größere Versagenslast hat. Daraus lässt sich ableiten,

ob es sich bei den beobachteten Spannungsspitzen um numerische oder um reale Effekte handelt.

Als letzte Schäftgeometrie wurde noch diejenige mit reduzierter Gesamtschäftlänge nach Geometrie V5 untersucht. In Abbildung 4.7 (d) zeigt sich, dass mit variablem Schäftwinkel auch bei reduzierter Gesamtschäftlänge in den  $0^\circ$ -Lagen nicht das Spannungsniveau der konstanten Schäftung erreicht wird. Wie in Abbildung 4.7 (b) sind allerdings auch Spannungsspitzen an den Übergängen der einzelnen Lagen des Laminats zu erkennen. Hier müssen in Zukunft nach den Erkenntnissen des Vergleichs der Geometrien V2 und V7 gegebenenfalls noch Anpassungen durchgeführt werden.

Die hier vorgestellten Simulationen zeigen deutlich das bisher ungenutzte Potenzial zur Festigkeitssteigerung beziehungsweise zur Reduzierung der Größe einer geschäfteten Reparatur. Offen bleiben jedoch noch Detailfragen über den Spannungsverlauf, vor allem im als versagenskritisch identifizierten Schnitt unter  $\varphi = 0^\circ/180^\circ$ , sowie den Einfluss von numerischen Effekten. Auf die erste Frage wird nun im folgenden Abschnitt eingegangen, für die zweite sei auf das Kapitel 6 verwiesen.

### 4.5.3 Spannungsverteilung über der Klebschichtlänge

Mit der Analyse der flächigen Spannungsverteilung für die unterschiedlichen Schäftgeometrien konnte gezeigt werden, dass durch einen lagenangepassten Schäftwinkel Spannungsspitzen in der Klebschicht vermieden werden können. In Abbildung 4.8 sind für die weitere Analyse die Spannungsverläufe in der konstanten (schwarz) und zwei variablen (V2: rot, V7: grün) Schäftungen im  $0^\circ$ -Schnitt über der Klebschichtlänge aufgetragen.

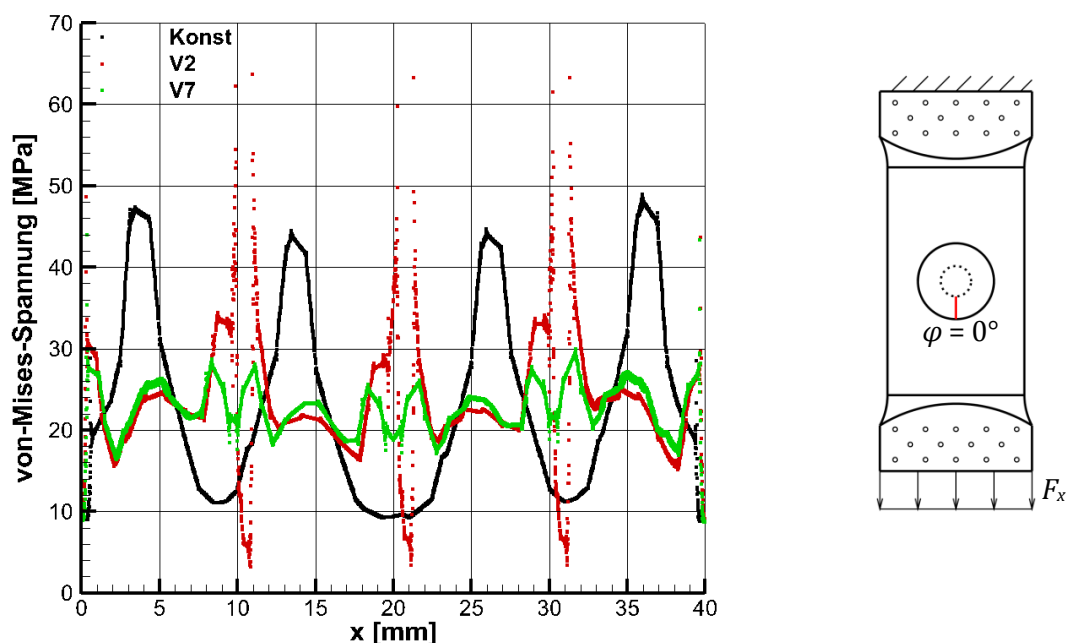


Abbildung 4.8: Von-Mises-Spannungsverläufe im  $0^\circ$ -Schnitt bei verschiedenen Schäftgeometrien ( $\varepsilon = 0,35\%$ )

Bei der konstanten Schäftung ist gut zu erkennen, wie im Bereich der vier  $0^\circ$ -Lagen der Großteil der Last in der Klebschicht übertragen wird, während die Spannung um die  $90^\circ$ -Lagen nur rund ein Viertel der Maximalwerte betragen. Daraus wird deutlich, dass bei steigender Belastung in diesen Bereichen die Tragkraft der Klebschicht nicht ausgenutzt wird, während an den  $0^\circ$ -Lagen bereits die Bruchlast erreicht wird. Wie in Abschnitt 2.3.1 vorgestellt, wird als erster Ansatz einer variablen Schäftung die Geometrie V2 untersucht. In Abbildung 4.8 ist zu erkennen, dass es tatsächlich gelingt, die Spannungserhöhungen in den  $0^\circ$ -Lagen zu reduzieren und stattdessen den Traganteil der  $\pm 45^\circ$ - und  $90^\circ$ -Lagen zu erhöhen. Auffällig ist allerdings, dass es nun in anderen Bereichen zu noch stärker ausgeprägten Spannungsspitzen kommt. Diese sind nicht mehr direkt einer Lage des Ausgangslaminats zuzuordnen, sondern treten lokal an den Übergängen zwischen zwei Lagen auf. Ein erster Ansatz zur Reduzierung dieser Spannungsspitzen bestand darin, die Differenz zwischen den einzelnen Schäftwinkeln zu verkleinern. Mit der dabei erstellten Geometrie V7 werden diese Spannungsspitzen vollständig vermieden. Abbildung 4.8 zeigt hier einen deutlich glatteren Verlauf der Spannungsverteilung, der nur noch um 30 % des Mittelwertes variiert.

Nachdem gezeigt werden konnte, dass die in der Schäftgeometrie V2 auftretenden Spannungsspitzen durch angepasste Schäftwinkel vermieden werden können, stellt sich die Frage nach der Ursache. Zur weiteren Detailuntersuchung dieses Phänomens sind in Abbildung 4.9 zum einen in (a) der Spannungsverlauf über die gesamte Schäftlänge mit der Schäftgeometrie V2 und zum anderen in (b) eine Ausschnittvergrößerung um die doppelte  $90^\circ$ -Lage mit den benachbarten  $\pm 45^\circ$ -Lagen aufgetragen. Mit den schwarzen Linien sind in beiden Abbildungen die Grenzen zwischen den Lagen des Laminats markiert. Dabei fällt zunächst auf, dass die Spannungsspitzen nicht deckungsgleich mit den Grenzflächen der Lagen des Ausgangslaminats sind. Diese Verschiebung ist allerdings nicht an allen Positionen gleich, sodass sie nicht einfach auf eine fehlerhafte Auftragung des Spannungsverlaufs über der Schäftgeometrie zurückgeführt werden kann.

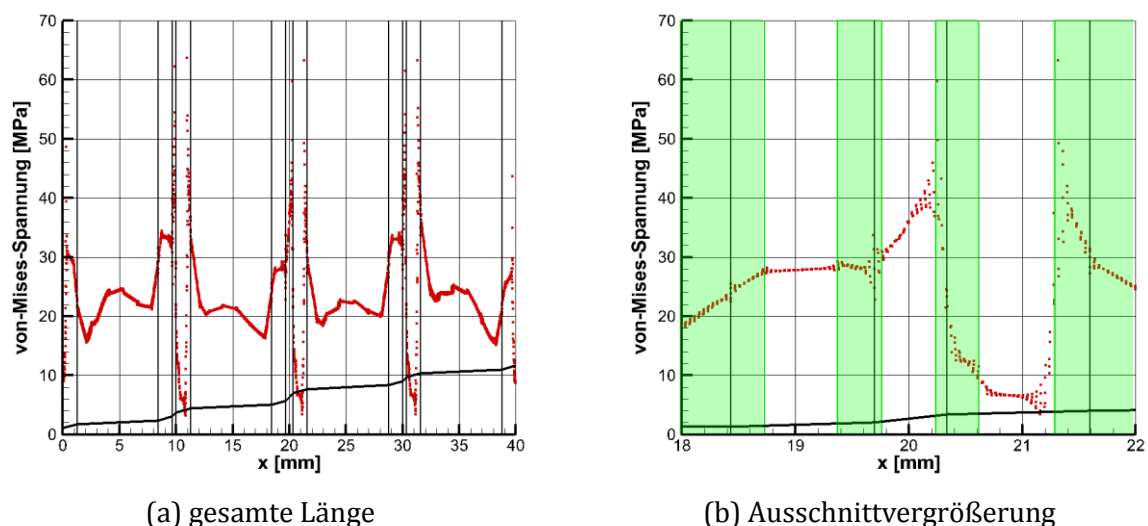


Abbildung 4.9: Von-Mises-Spannungsverteilung über der Klebschichtlänge bei variablem Schäftwinkel (V2)

Eine weitere mögliche Ursache liegt in der Geometrie der Schäftung, die in Abbildung 4.10 noch einmal aufgetragen ist. Bei der Erstellung der Klebschicht durch Normalenverschiebung der Mittellinie wandern die Knickpunkte der Kontur zwangsweise in die Lagen. Daraus



resultiert, dass die Lagen teilweise den Schäftwinkel der benachbarten Lagen erhalten. Dies ist vor allem dann kritisch, wenn eine Lage mit einem zu großen Winkel versehen wird.

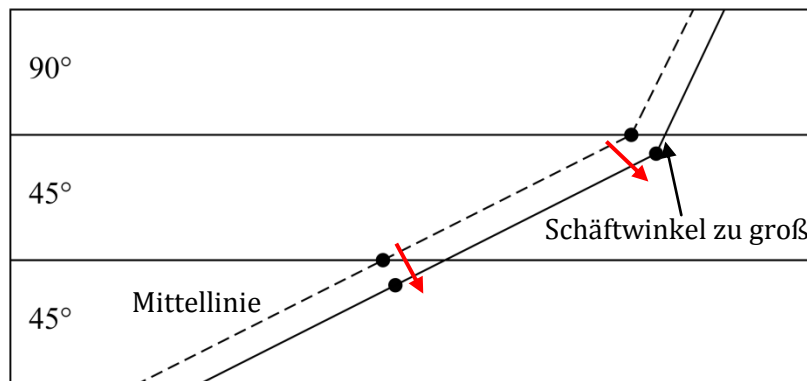
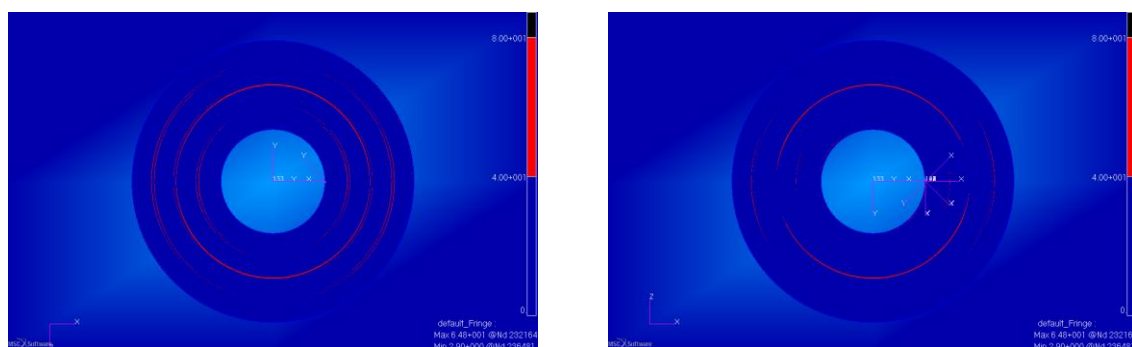


Abbildung 4.10: Geometrie der Schäftung mit Knickpunkten in den benachbarten Lagen

In Abbildung 4.9 (b) sind grün die Bereiche markiert, in denen eine Lage mit dem Winkel der benachbarten Lage geschäftet wurde. Es ist gut zu erkennen, dass die Positionen der Spannungsspitzen deckungsgleich mit Grenzen dieser fehlerhaften Bereiche sind. Interessant ist allerdings, dass nicht an allen Grenzen Spannungsspitzen auftreten. So treten die Spannungsspitzen besonders dann auf, wenn die Schäftung auf einen flacheren Winkel wechselt und der falsche Winkel in der Reparaturlage liegt. Eine mögliche Erklärung hierfür liegt darin, dass sich die Klebschicht auf der Seite des Ausgangsmaterials unter Belastung direkt mit der Grenzfläche verformt und somit ein Knick in der Geometrie keine entscheidende Rolle spielt. Auf der Seite des Reparaturmaterials muss hingegen die Kraft von der Klebschicht in das Laminat eingebracht werden. Hierbei wirkt sich ein Knick in der Kontur einer Lage deutlicher auf die Spannung in der Klebschicht aus. Bei der Betrachtung der Verbindung zwischen Laminat und Klebschicht müssen somit zwei Mechanismen unterschieden werden:

- 1) Ausgangslaminat – Klebschicht: Direktes Aufprägen der Verschiebung des Ausgangslaminats
- 2) Klebschicht – Reparaturlaminat: Einbringen der Spannungen aus der Klebschicht in das Laminat

Für diese Annahme spricht, dass an der Grenzfläche Klebschicht – Reparaturmaterial die Spannungsspitzen deutlicher ausgeprägt sind als an der Grenze zwischen Ausgangslaminat und Klebschicht (Abbildung 4.11).



(a) Klebschicht - Reparaturlagen  
(b) Ausgangslaminat - Klebschicht  
Abbildung 4.11: Darstellung der Von-Mises-Spannungsspitzen an den Grenzflächen zwischen Klebschicht und Laminat

Dies würde auch erklären, warum dieses Phänomen in den bereits untersuchten 2D-Geometrien nicht aufgetreten ist. In diesen Fällen werden an beiden Grenzflächen die Verformungen direkt vorgegeben und somit kommt der zweite Mechanismus, der aus der Klebschicht eine Verformung auf einen relativ starren Körper aufprägt, nicht zum Tragen.

Es kommt allerdings auch in Betracht, dass es sich bei den beobachteten Spannungsspitzen um rein numerische Effekte an den Unstetigkeiten der Kontur handelt. Zur Überprüfung wurde die Schäftgeometrie V7 erstellt. Sollte es sich tatsächlich um physikalische Effekte handeln, so müsste diese Geometrie im Zugversuch eine höhere Bruchlast aufweisen als V2. Wenn die Ergebnisse allerdings auf dem gleichen Niveau liegen sollten, so ist davon auszugehen, dass entweder die Spannungsspitzen auf rein numerische Effekte zurückzuführen oder nicht versagenskritisch sind.

## 4.6 Vergleich mit der analytischen Spannungsberechnung

In Abbildung 4.12 (a) und (b) werden die Ergebnisse der numerischen und der analytischen Spannungsberechnung in der Klebschicht bei konstanter Schäftung gegenübergestellt. Dabei ist gut zu erkennen, dass die Spannungen in den Bereichen der  $0^\circ$ -Lagen deutlich größer sind. In beiden Fällen liegt die maximal auftretende Differenz in der gleichen Größenordnung von etwa 10 % der größten auftretenden Spannung. Allerdings ist die Trennung der Bereiche in der analytischen Lösung deutlich schärfer. Dies liegt daran, dass in der numerischen Simulation das gesamte Laminat und somit auch der Einfluss von benachbarten Lagen betrachtet wird. In der analytischen Spannungsberechnung hingegen werden die Bereiche der einzelnen Lagen unabhängig voneinander betrachtet.

Auch der versagenskritische Bereich um  $\varphi = 0^\circ$  wird in beiden Rechnungen ähnlich dargestellt. In der analytischen Lösung nimmt die Spannung in Umfangsrichtung vor allem bei größeren Radien allerdings stärker ab als in der numerischen Simulation. Dies ist vermutlich auf die Annahme des idealen einachsigen Spannungszustands in der analytischen Berechnung zurückzuführen. Bei dem dreidimensionalen Spannungszustand in der numerischen Simulation nimmt der effektive Schäftwinkel in Spannungsrichtung langsamer ab, wodurch die Bereiche um  $\varphi = 0^\circ$  stärker belastet werden.

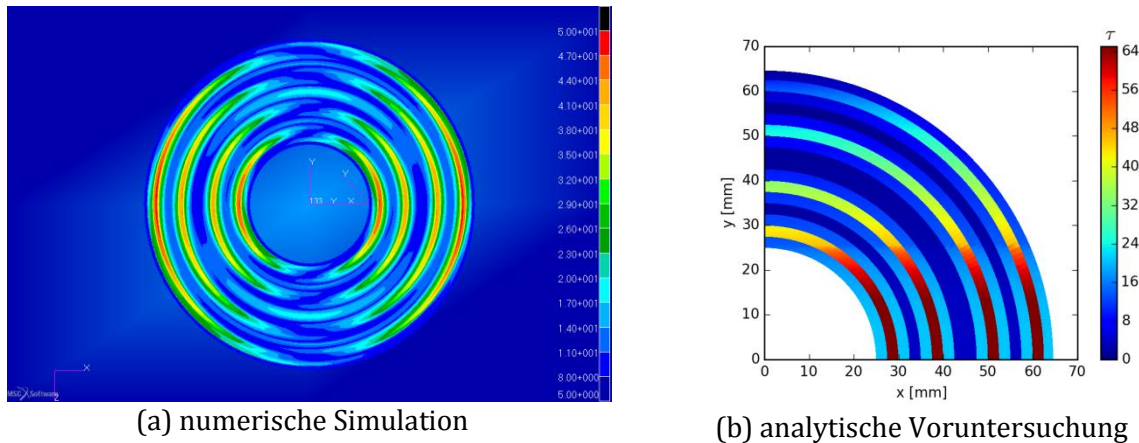


Abbildung 4.12: Vergleich der numerisch und analytisch berechneten Spannungsverteilungen in der Klebschicht bei konstanter Schäftung

Anders als in der analytischen Spannungsberechnung zeigt sich in der numerischen Simulation deutlich das orthotrope Materialverhalten der einzelnen UD-Schichten. Dies ist vor allem unter  $\varphi = 90^\circ$  gut an den Spannungen im Bereich der  $\pm 45^\circ$ -Lagen zu erkennen. In der analytischen Spannungsberechnung findet sich hier durch die Annahme eines isotropen Materialverhaltens eine vollständig symmetrische Spannungsverteilung. Auch die zuvor angenommene Vereinfachung eines ideal einachsigen Spannungszustandes wird in der numerischen Simulation widerlegt. Dies ist gut unter  $\varphi = 90^\circ$  zu sehen, wo vor allem in der doppelten  $90^\circ$ -Lage in der Mitte des Laminats eine Spannungserhöhung auftritt, die in der analytischen Lösung nicht abgebildet wird.

Abgesehen von Abweichungen, die weder den versagenskritischen Bereich unter  $\varphi = 0^\circ$  betreffen, noch zu besonderen Spannungsspitzen führen, konnte gezeigt werden, dass auch ohne aufwendige numerische Simulation ein qualitativer Eindruck über die Spannungen in einer konstant geschäfteten Reparaturstelle gewonnen werden kann.

Der Einfluss eines lagenvariablen Schäftwinkels mit der Geometrie V2 ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Prinzipiell zeigen beide Ergebnisse, dass eine Reduzierung der Spannungsspitzen im Bereich der  $0^\circ$ -Lagen mit einer Anhebung des Spannungsniveaus in den anderen Bereichen ausgeglichen werden kann. In beiden Ergebnissen ist gut zu sehen, dass bei der gewählten Geometrie die  $45^\circ$ -Lagen am stärksten belastet werden, wobei die kleinste Spannung unter  $\varphi = 0^\circ$  bei etwa 50 % der maximalen Spannung liegt. Die bei der konstanten Schäftung auftretenden Spannungsspitzen in den  $0^\circ$ -Lagen wurden sowohl in der analytischen als auch in der numerischen Rechnung um etwa 50 % reduziert.

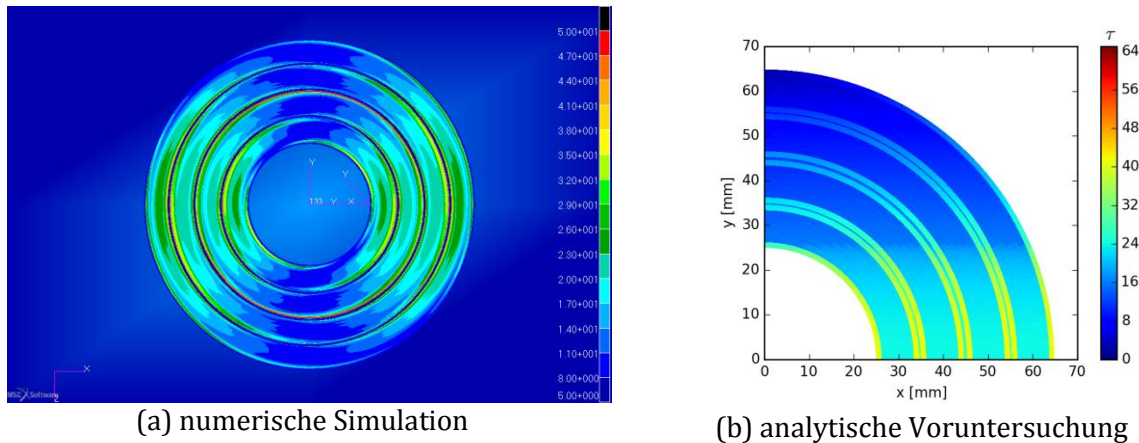


Abbildung 4.13: Vergleich der numerisch und analytisch berechneten Spannungsverteilungen in der Klebschicht bei variabler Schäftung nach Geometrie V2

In der analytischen Rechnung werden die Spannungsspitzen an den Übergängen zwischen zwei Lagen allerdings nicht abgebildet. Dies liegt vermutlich daran, dass zum einen die Einzellagen und nicht der Verbund betrachtet werden und zum anderen von einer unendlich dünnen Klebschicht ausgegangen wird. Der bei der numerischen Simulation berücksichtigte Effekt, dass sich in einer Lage der Schäftwinkel ändern kann, wird analytisch daher nicht abgebildet.

Bei der Auswertung der numerischen und analytischen Berechnung der flächigen Spannungsverteilung in der Klebschicht zwischen dem Ausgangs- und dem Reparaturmaterial konnte gezeigt werden, dass beide Verfahren Ergebnisse mit guten Übereinstimmungen liefern. Mit beiden Methoden können die festigkeitskritischen Bereiche einer Schäftung mit konstantem Winkel identifiziert werden. Anschließend zeigen sowohl die analytische Spannungsberechnung, als auch die numerische Simulation das Potenzial einer lagenvariablen Schäftung, bei der die Spannungsspitzen im Bereich der  $0^\circ$ -Lagen um etwa 50 % reduziert werden können. Wie zu erwarten war, zeigt das Ergebnis der analytischen Rechnung ein weniger detailliertes Bild der Spannungsverteilung. Alle Unterschiede lassen sich aber unmittelbar mit den getroffenen Vereinfachungen und Annahmen erklären.

## 5 Fertigung

In diesem Kapitel werden die Abläufe der Fertigung der in den späteren Experimenten untersuchten Zugproben erläutert. Zuerst werden die verwendeten Materialien vorgestellt und anschließend wird auf die Fertigung von Probekörpern zur Qualifizierung der Fertigungsqualität sowie auf die Herstellung der Zugproben eingegangen.

### 5.1 Verwendete Materialien

#### 5.1.1 Ausgangslaminat

Das Ausgangslaminat zur Herstellung der Zugproben wird aus Prepreg-Material (8552 | 33 % | 134 | IM7 12K) mit dem Kohlefasertyp IM7 und dem Epoxidharz HexPly 8552 mit der symmetrischen Lagenfolge  $[+45^\circ, 0^\circ, -45^\circ, 90^\circ, +45^\circ, 0^\circ, -45^\circ, 90^\circ]_s$  aufgebaut. Das Material wird anschließend im Autoklaven bei 7 bar rel. Atm. und 180 °C ausgehärtet. Auf die Prozessparameter wird im Folgenden noch genauer eingegangen.

#### 5.1.2 Reparaturmaterialien

Zur Fertigung der Reparatur wird ein anderes Prepreg-Material (M20 | 33 % | 134 | IM7 12K) eingesetzt als für das Umgebungslaminat. Um mit dem ausgehärteten Material ähnliche Kennwerte wie im Umgebungslaminat zu erreichen, kommen die gleichen Fasern (IM7) zum Einsatz und nur das Epoxidharz ist ein anderes (HexPly M20). Dieses hat zum einen den Vorteil, dass es auch ohne Autoklaven mit 1 bar Vakuumdruck in einem Ofen mit Temperaturregelung ausgehärtet werden kann. Diese Eigenschaft macht es als Reparaturmaterial besonders interessant, da im industriellen Einsatz nicht immer ein ausreichend großer Autoklav zur Verfügung steht und die Aushärtung auch durch lokale Erwärmung großer Bauteile relativ einfach durchgeführt werden kann. Zum anderen wird zum Aushärten eine geringere Temperatur von 130 °C benötigt.

Als Haftvermittler zwischen dem Umgebungslaminat und den Reparaturlagen kommt der Filmklebstoff Hysol EA 9695 zum Einsatz. Da dieser als getränktes Vlies vorliegt kann er einfach auf die passende Größe zugeschnitten und in die Schäftung eingelegt werden.

## 5.2 Herstellung von Probekörpern zur Qualifizierung der Fertigungsqualität

Vor der Fertigung der Zugproben wurden Probekörper hergestellt, an denen die Fertigungsqualität eingeschätzt werden kann. Dies ist vor allem deswegen notwendig, da bei den Zugproben erst nach dem Prüfen die Qualität der Reparatur, zum Beispiel im Hinblick auf die Klebschichtdicke und die Positionierung der einzelnen Lagen, beurteilt werden kann. In vorangegangenen Arbeiten wurde bereits gezeigt, dass die Fertigungsqualität einen großen Einfluss auf die Festigkeit der geschäfteten Verbindung hat [4].

Als Probekörper wurden quadratische Platten mit 20 cm Kantenlänge aus dem gleichen Material und mit dem gleichen Lagenaufbau  $([+45^\circ, 0^\circ, -45^\circ, 90^\circ, +45^\circ, 0^\circ, -45^\circ, 90^\circ]_s)$  wie die späteren Zugproben hergestellt. Diese wurden exemplarisch mit der Schäftgeometrie V2 versehen. Da sich an dem prinzipiellen Fertigungsablauf für die beiden Geometrien mit variablem Schäftwinkel (V5 und V7) nichts ändert, können die Erkenntnisse direkt übertragen werden. Da die lagenvariablen Schäftungen mit den Knicken in der Geometrie komplexer sind als die konstante Schäftung, wurde auf die Voruntersuchung letzterer verzichtet.

Vor den Reparaturlagen wird der Filmklebstoff aufgelegt. Damit sich dieser an die Geometrie anlegt, wird er mit einem Vakuumaufbau flächig auf die Schäftung gepresst (Abbildung 5.1). Dieses Zwischenkompaktieren vermindert unter anderem die Bildung von Luftblasen im Aufbau der Reparatur und wird auch nach jeweils vier aufgelegten neuen Lagen durchgeführt. Am Schluss bleibt der gesamte Aufbau über Nacht unter Vakuum stehen.

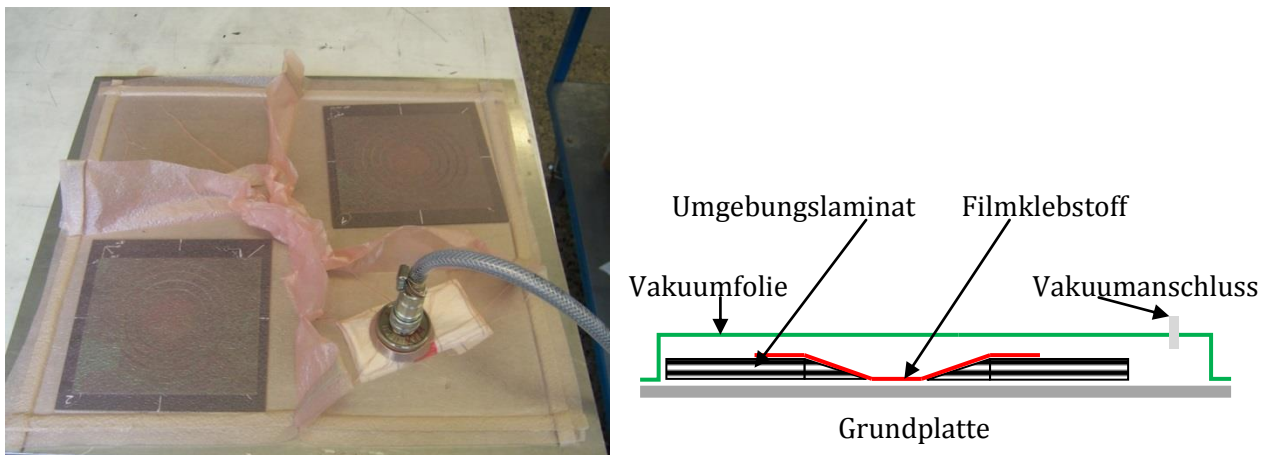


Abbildung 5.1: Vakuumaufbau zum Zwischenkompaktieren



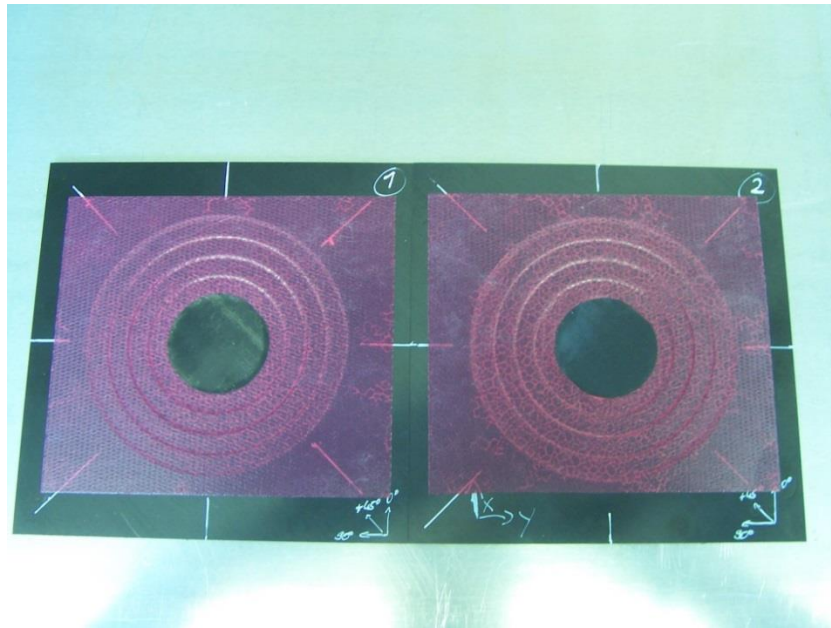


Abbildung 5.2: Probeschäftungen mit eingelegtem Filmklebstoff und den ersten Reparaturalagen

In Abbildung 5.2 ist dargestellt, wie sich der Filmklebstoff mit diesem Aufbau der Kontur der variablen Schäftung anpasst. Die dabei entstehenden Kanten werden als Orientierung beim Legen des Reparaturmaterials genutzt.

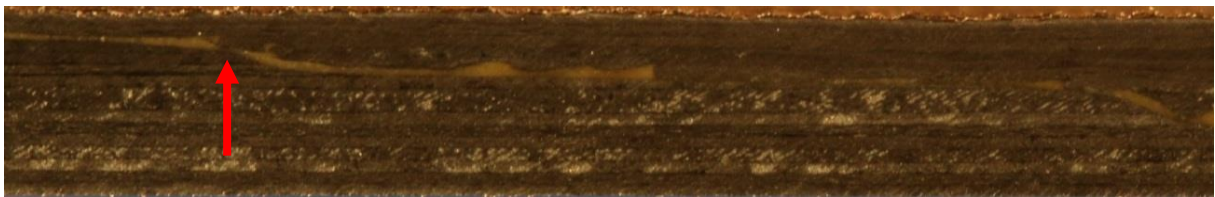
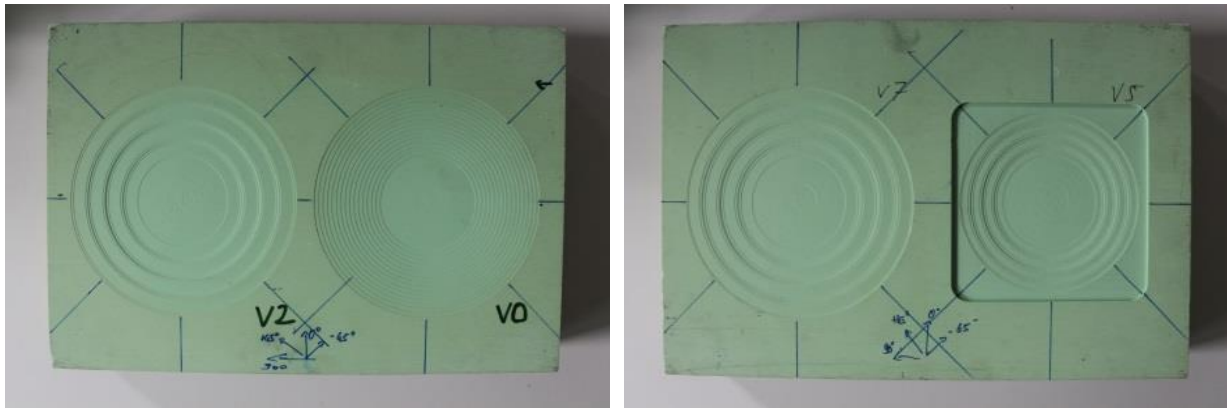


Abbildung 5.3: Ausschnitt der Schäftung einer Testplatte mit Geometrie V2

In Abbildung 5.3 zeigt sich allerdings, dass diese Kanten nicht ausreichend sind, um das neue Material genau zu positionieren. Mit dem roten Pfeil ist eine Stelle markiert, an der die rechts liegende Reparaturalage zu weit nach links gerutscht ist. Daraus ergibt sich unter anderem eine unregelmäßige Klebschichtdicke. Auf diese Weise lässt sich somit keine ausreichende Fertigungsqualität erreichen. Darüber hinaus fehlen die Orientierungskanten bei der Schäftung mit konstantem Winkel, sodass eine andere Lösung zum Positionieren der Reparaturalagen benötigt wurde. Für jede Schäftgeometrie wurde ein in Abbildung 5.4 (a) und (b) gezeigtes Preforming-Werkzeug hergestellt, welches eine genauere Positionierung der Lagen ermöglicht. In dieses Werkzeug werden nacheinander alle Lagen des Reparaturmaterials unter Zwischenkompaktieren nach vier Lagen eingelegt. Zur Orientierung für die Ausrichtung der UD-Lagen wurden auf dem Preforming-Werkzeug Markierungslinien unter  $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  und  $90^\circ$  aufgebracht. Abschließend wird der so vorbereitete Reparaturpatch in die Schäftung mit dem Filmklebstoff eingelegt. Die Ausrichtung erfolgt dabei über die sichtbare oberste  $45^\circ$ -Lage des Umgebungsmaterials und die Positionierung anhand der sichtbaren äußeren Kante des Schäftbereichs.



(a) Vorderseite

(b) Rückseite

Abbildung 5.4: Vorder- und Rückseite des Preforming-Werkzeugs

## 5.3 Zugprobenfertigung

In diesem Abschnitt wird die Fertigung der Zugproben erläutert, die sich in 6 Etappen unterteilen lässt (Abbildung 5.5). Dabei werden zuerst Grundplatten aus dem Prepreg-Material hergestellt (1), die anschließend auf die richtige Größe zugeschnitten werden (2). Anschließend werden die in Abschnitt 2.3.3 vorgestellten GFK-Doppler mit dem gleichen Filmklebstoff, der auch in der Reparaturstelle verwendet wird, aufgebracht (3). In den nächsten Schritten wird die Schäftung gefräst (4) und das Reparaturmaterial eingelegt (5). Zum Abschluss werden die endgültige Kontur der Probe und die Lochmuster zur Befestigung der Probe an den Spannbacken der Prüfmaschine gefräst (6).

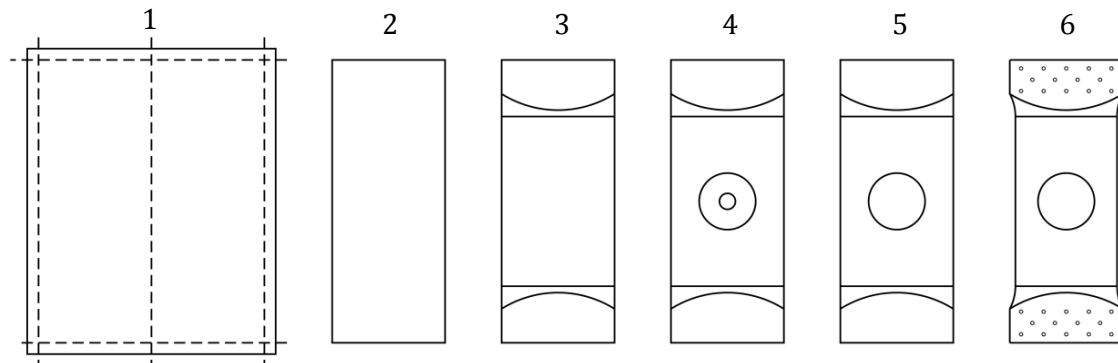


Abbildung 5.5: Skizze zum Ablauf der Zugprobenfertigung

### 5.3.1 Grundplatten aus dem Ausgangslaminat

Die Grundplatten zur Fertigung der Zugproben werden aus rechteckigen Prepreg-Zuschnitten per Hand geschichtet und anschließend im Autoklaven ausgehärtet. Die Größe der Platten ist dabei so gewählt, dass, wie in Abbildung 5.6 dargestellt, aus einer Grundplatte jeweils zwei Proben gesägt werden können.



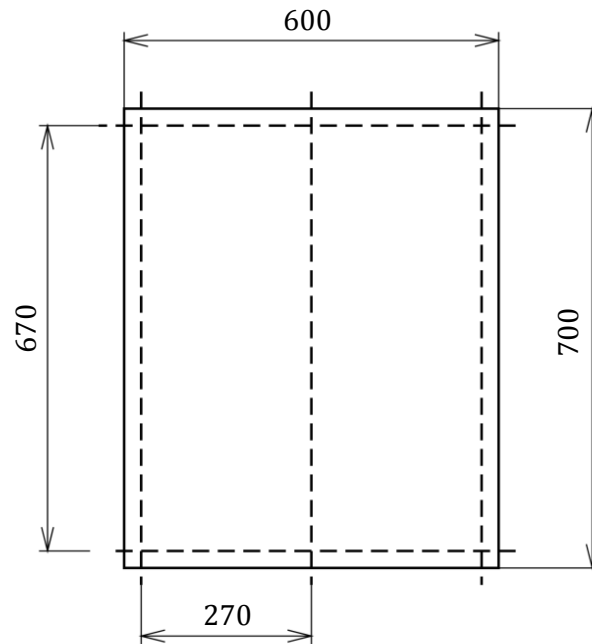


Abbildung 5.6: Skizze einer Grundplatte für zwei breite Zugproben

Die Zuschnitte werden dabei auf einem computergesteuerten Cutter gefertigt, wodurch diese zum einen alle exakt gleich groß sind und es zum anderen zu keinen Abweichungen in der Faserrichtung der einzelnen Lagen kommt, wie sie etwa bei einer leicht verdreht aufgelegten Schablone auftreten können. Die hergestellten Zuschnitte werden anschließend per Hand aufeinander gelegt, wobei ein Stahlwinkel als Anschlag zur Positionierung dient. So wird sichergestellt, dass alle Lagen deckungsgleich gelegt werden.

Zum Aushärten der Platten im Autoklaven werden diese in dem in Abbildung 5.7 gezeigten Vakuumaufbau verpackt. Als Unterlage dient eine Stahlplatte, die dafür sorgt, dass das Laminat beim Aushärten gerade bleibt und eine ebene Oberfläche erhält. Um dies auch auf der anderen Seite zu erreichen, kommt hier ein 2 mm dickes Deckblech aus Aluminium zum Einsatz. Zwischen dem Laminat und der Grundplatte beziehungsweise dem Deckblech wird Trennfolie verwendet, um eine Verbindung zwischen Laminat und Metall zu verhindern. Zum Entlüften des Laminats während des Aushärteprozesses werden an den Rändern des Laminats im Abstand von 10 cm Glasfaserrovings gelegt. Zur Fixierung des Aufbaus aus Laminat, Trennfolie und Deckblech auf der Grundplatte werden alle Ränder mit Siegelkitt umgeben. Über den gesamten Aufbau wird anschließend Abreißgewebe gelegt. Dadurch wird verhindert, dass die Vakuumfolie an dem Siegelkitt um den Laminataufbau oder an der glatten Oberfläche der Grundplatte Bereiche luftdicht abschließt. In diesen könnten sich sonst Luftblasen bilden, die sich während des Aushärteprozesses lösen und damit den Druck im gesamten Aufbau ansteigen lassen.

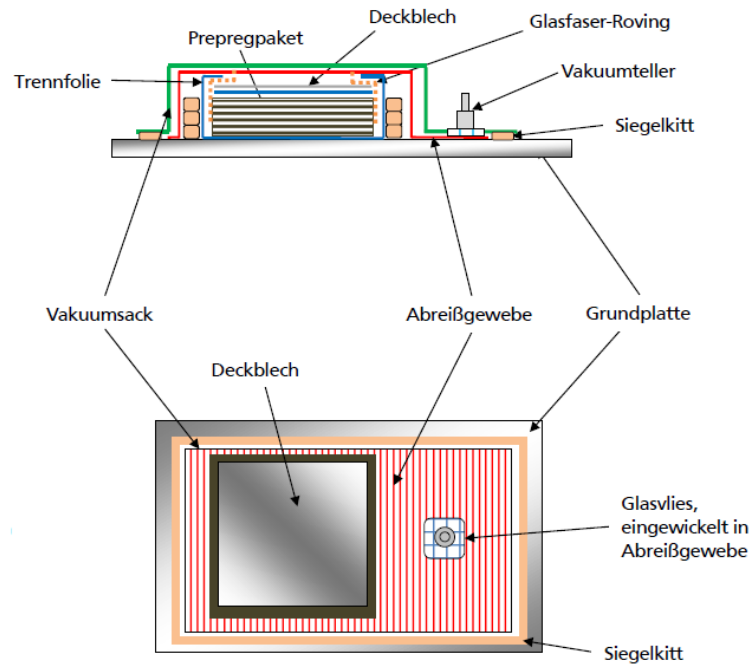


Abbildung 5.7: Vakuumaufbau für die Grundplatten [4]

Die Parameter des Aushärtprozesses im Autoklaven sind in Abbildung 5.8 dargestellt. Dabei wird zunächst im Autoklaven ein Überdruck von 7 bar rel. Atm. aufgebaut. Hierbei ist darauf zu achten, dass die während des gesamten Prozesses an den Aufbau angeschlossene Vakuumpumpe keinen Druckanstieg zeigt. Dies würde für ein Leck sprechen, das vor Erhöhung der Temperatur beseitigt werden muss. Anders als in Abbildung 5.8 gezeigt, wurde das Vakuum zu Beginn nicht von -1 bar rel. Atm. auf -0,2 bar rel. Atm. reduziert. Der Grund dafür ist, dass so eventuell im Prozess auftretende Undichtigkeiten erkannt werden können.

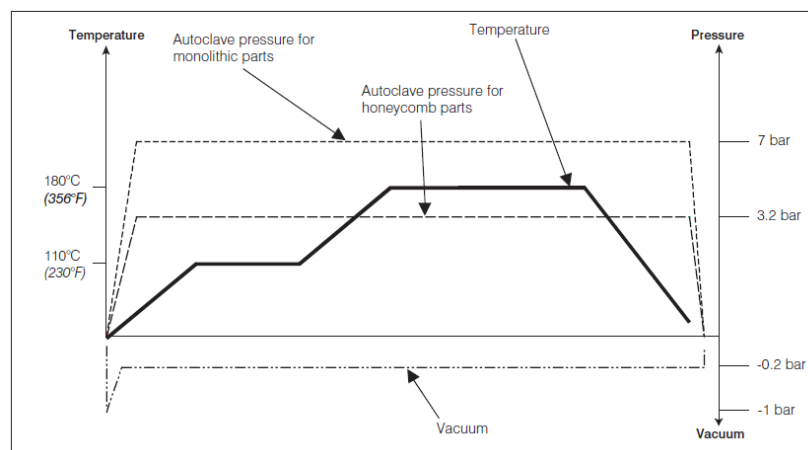


Abbildung 5.8: Autoklavzyklus zum Fertigen der Grundplatten [4]

### 5.3.2 GFK-Doppler zur Einleitung der Prüfkräfte

Die GFK-Doppler zum Einleiten der Kräfte in die Zugproben auf der Prüfmaschine werden aus fertigen Platten auf dem gleichen Cutter, der auch für die Zuschnitte der Prepreg-Lagen genutzt wurde, gefräst. Die Geometrien sind in Abbildung 5.9 abgebildet. Dabei ist die spätere

Taillierung der Proben noch nicht berücksichtigt. Da diese jedoch im letzten Arbeitsschritt gefräst wird, können die Dopplergeometrien relativ einfach gestaltet werden.

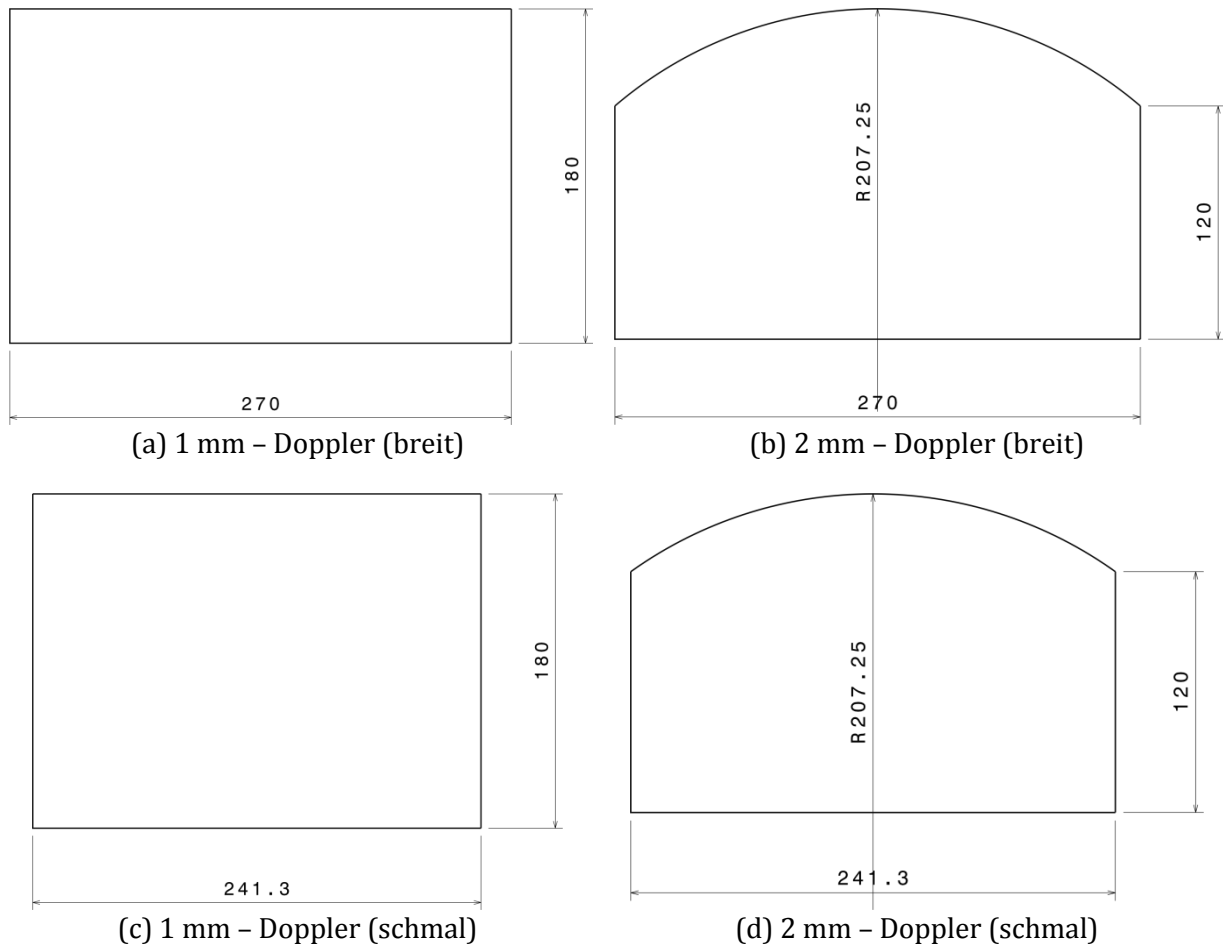


Abbildung 5.9: Geometrien der GFK-Doppler

### 5.3.3 Einbringen der Reparatur

Wie bereits in Abschnitt 5.1 vorgestellt, wurde für die Reparaturen ein anderes Prepregmaterial verwendet als für die Ausgangslamine. Dieses besteht aus den gleichen Fasern aber einem anderen Harz. Daher besitzt es im ausgehärteten Zustand ähnliche Eigenschaften bezüglich der Festigkeit und Steifigkeit. Es hat allerdings den Vorteil, dass es ohne Autoklaven unter 1 bar Vakuumdruck in einem Ofen mit programmierbarem Temperaturverlauf ausgehärtet werden kann. Der Temperaturverlauf dafür ist in Abbildung 5.10 aufgezeichnet.

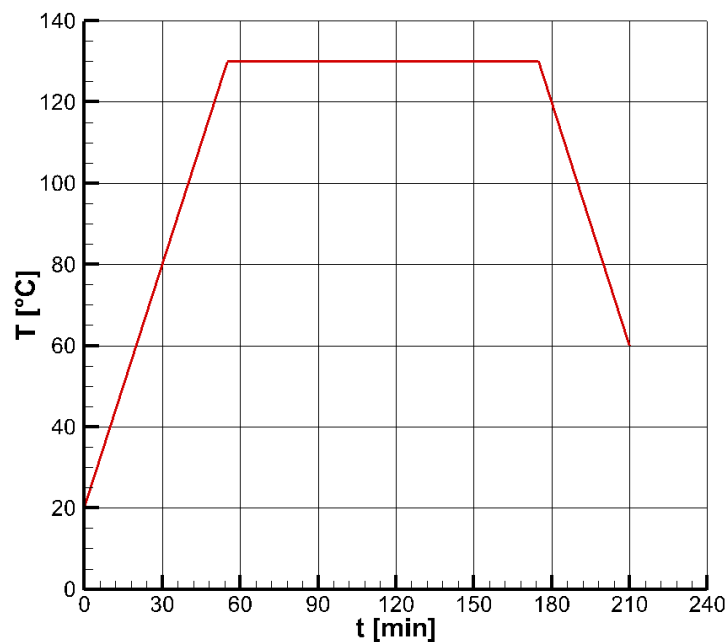


Abbildung 5.10: Temperaturverlauf zum Aushärten des Reparaturmaterials

Nicht nur der Aushärteprozess, sondern auch der Vakuumaufbau unterscheidet sich von dem der Grundplatten. Aufgrund der Doppler kann dieser nicht mehr auf einer ebenen Stahlplatte aufgebaut werden, da sich sonst die Probe unter dem Umgebungsdruck durchbiegen würde. Darüber hinaus konnte bereits gezeigt werden, dass zur Herstellung einer möglichst dünnen Klebschicht die offenen Ränder der Reparaturstelle mit Abreißgewebe belegt werden sollten [15].

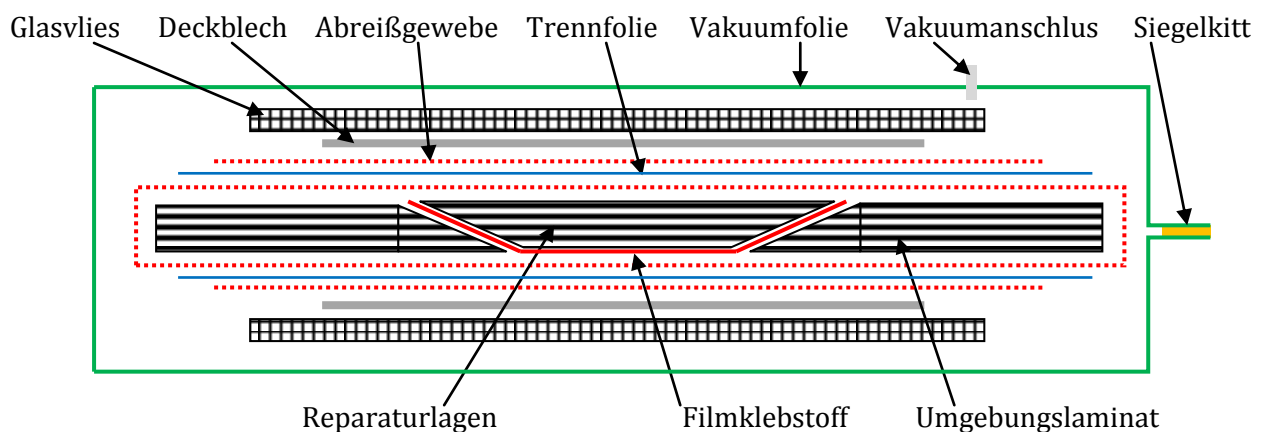


Abbildung 5.11: Vakuumaufbau für die Reparaturlagen

In Abbildung 5.11 ist der Vakuumaufbau zum Aushärten der Reparaturlagen skizziert. Dabei ist dargestellt, dass das Ausgangslaminat mit dem Filmklebstoff und den Reparaturlagen zuerst vollständig in Abreißgewebe eingeschlagen ist. Dies dient zum einen der Aufnahme von überflüssigem Klebstoff im Bereich der Schäftung und zum anderen der Entlüftung während des Aushärtens. Anschließend folgen jeweils eine Lage Trennfolie und Abreißgewebe. Die Trennfolie dient als Sperre für den im Prozess flüssigen Klebstoff und das Abreißgewebe der Entlüftung. Darauf wird ein Deckblech positioniert, welches dafür sorgt, dass die Reparaturlagen in der

Ebene des Ausgangslaminats gehalten werden. Das darüber liegende Glasvlies dient wiederum der Entlüftung. Der gesamte Aufbau wird symmetrisch ausgeführt und anschließend in Vakuumfolie eingepackt und evakuiert. Vor dem Aushärtungsprozess bleibt der Aufbau mindestens 16 h im evakuierten Zustand liegen. Damit soll sichergestellt werden, dass alle Luft aus dem Glasvlies und vor allem der Reparaturstelle entweichen kann.



## 6 Experimente

In diesem Kapitel über die experimentellen Untersuchungen der geschäfteten Zugproben werden nacheinander das Probenprogramm und der eingesetzte Versuchsaufbau mit der Messtechnik vorgestellt. Anschließend werden die Ergebnisse der Messungen bezüglich der Festigkeit, Steifigkeit und dem Verhalten der Proben während der Prüfung präsentiert.

### 6.1 Zielsetzung und Probenprogramm

Das Ziel der im Folgenden präsentierten experimentellen Untersuchungen ist, die in der analytischen und numerischen Spannungsberechnung präsentierte Festigkeitssteigerung von geschäfteten Reparaturen durch lagenvariable Schäftwinkel zu verifizieren.

Zu diesem Zweck wurde ein Prüfprogramm mit insgesamt 9 Zugproben erstellt. Mehr Proben hätten einen größeren zeitlichen Aufwand in der Fertigung und den Prüfungen bedeutet, der den Umfang dieser Arbeit überstiegen hätte. Die Aufteilung der Proben auf die in Abschnitt 2.3 vorgestellten Schäftgeometrien erfolgt nach Tabelle 6.1.

Tabelle 6.1: Übersicht über die Schäftgeometrien der Zugproben

Geometrie	Anzahl Zugproben
konstante Schäftung	3
V2	2
V5	2
V7	2

Ursprünglich waren für das Probenprogramm nur die Geometrien mit der konstanten und der variablen Schäftungen V2 und V5 vorgesehen. Im Zuge der numerischen Untersuchung wurde allerdings zusätzlich die Schäftgeometrie V7 entwickelt. Da die Gesamtanzahl der Zugproben festgelegt war, konnten von den Proben mit lagenvariabler Schäftung nur noch jeweils zwei statt drei geprüft werden. Um für mögliche spätere Untersuchungen eine gute Grundlage bereitzustellen, wurden trotzdem drei Proben mit konstanter Schäftung geprüft.

### 6.2 Versuchsanlage und Messtechnik

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über den Versuchsaufbau zur Prüfung der Zugproben gegeben und die unterschiedlichen Messmethoden präsentiert.

### 6.2.1 Prüfmaschine und Versuchsaufbau

Zur Prüfung der hergestellten Zugproben stand eine Prüfmaschine des Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik am DLR in Braunschweig zur Verfügung. Diese ist sowohl für dynamische als auch statische Versuche geeignet und kann eine maximale Prüfkraft von 1000 kN aufbringen. Eine Abschätzung der benötigten Prüfkraft aus ähnlichen, bereits durchgeführten Versuchen führte auf etwa 300 kN bei einer quasistatischen Belastung mit 2 mm/min. Während der Prüfung werden von der Maschine die Prüfkraft und der zurückgelegte Weg des unteren, beweglichen Spannfüßers aufgezeichnet. Aus diesen Daten lassen sich später die Spannungs-Dehnungs-Kurven der gesamten Probe berechnen.



Abbildung 6.1: In der Prüfmaschine eingespannte Zugprobe

In Abbildung 6.1 ist eine in der Prüfmaschine eingespannte Zugprobe dargestellt. Die Einleitung der aufgebrachten Prüfkraft erfolgt dabei nicht über einen Formschluss der Schrauben mit dem Bohrungsmuster der Proben, sondern über die Pressung der Spannbacken. Dies ermöglicht eine gleichmäßigere Krafteinleitung und soll verhindern, dass die Probe durch Lochleibungsversagen an der Einspannung vorzeitig versagt.

### 6.2.2 Punktuelle Messungen mit Dehnmessstreifen

Zusätzlich zu der Aufzeichnung der Kräfte und des zurückgelegten Weges an der Prüfmaschine wurden an drei, in Abbildung 6.2 definierten, Punkten auf den Proben Dehnmessstreifen (DMS) positioniert. Diese sind alle auf der Rückseite der Probe angebracht, da die Vorderseite für die im folgenden Abschnitt vorgestellte optische Messung der Dehnungsverteilung genutzt wird.



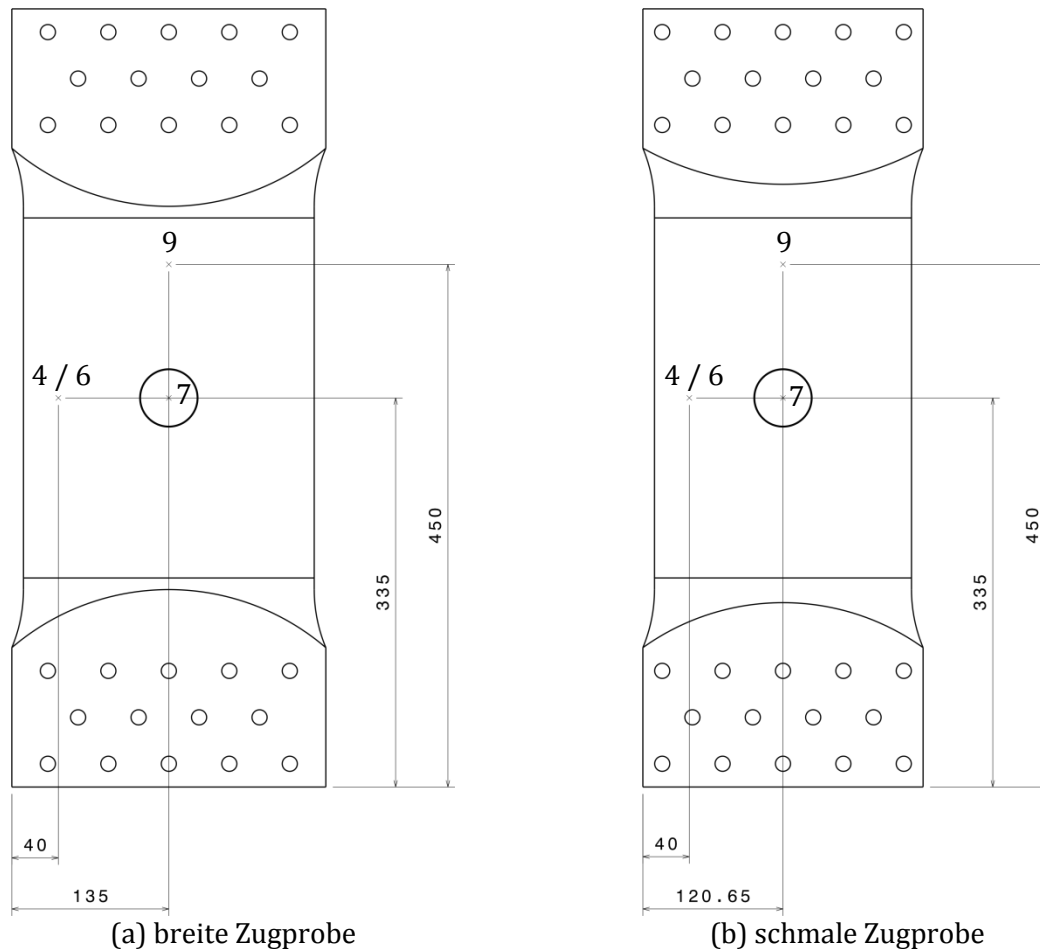


Abbildung 6.2: Positionen der Dehnungsmessstreifen mit Nummerierung auf der Rückseite der Zugproben

Die Bezeichnungen der DMS beruhen auf denjenigen ähnlicher Untersuchungen und dienen der Vergleichbarkeit. In Tabelle 6.2 sind die Ausrichtungen der DMS aufgelistet.

Tabelle 6.2: Übersicht über die Ausrichtung der DMS

DMS-Nummer	Ausrichtung [°]
4	0
6	90
7	0
9	0

Von besonderem Interesse ist dabei der Vergleich der 0°-DMS untereinander. DMS 9 zeigt die Dehnung des ungestörten Laminats und dient als Referenz. Der Vergleich dieser Dehnung mit denen in und neben der Reparatur soll Erkenntnisse über die Lastverteilung in und um die Reparaturstelle herum geben. Daraus lässt sich ableiten, wie die Traganteile verteilt sind.

Aus dem 90°-DMS 6 hingegen ergibt sich die Querkontraktion der Probe unter der anliegenden einachsigen Belastung. Daraus lassen sich Anhaltspunkte für folgende Untersuchungen an komplexeren Schäftgeometrien (wie zum Beispiel Ellipsen) gewinnen. Hierauf wird in dieser Arbeit allerdings nur kurz eingegangen.

### 6.2.3 Flächige optische Messungen mit ARAMIS

Zusätzlich zu den punktuellen Dehnungsmessungen mit den DMS wurde die Vorderseite der Probe für eine flächige, optische Dehnungsmessung mit dem System ARAMIS 12M der Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH (GOM) durchgeführt. Dazu wird die Probe mit einem stochastischen schwarz-weißen Muster lackiert. Durch die Aufnahme mit zwei Kameras aus unterschiedlichen Blickwinkeln lassen sich so die dreidimensionalen Verschiebungen aus den Änderungen des Musters mittels Korrelation ermitteln.

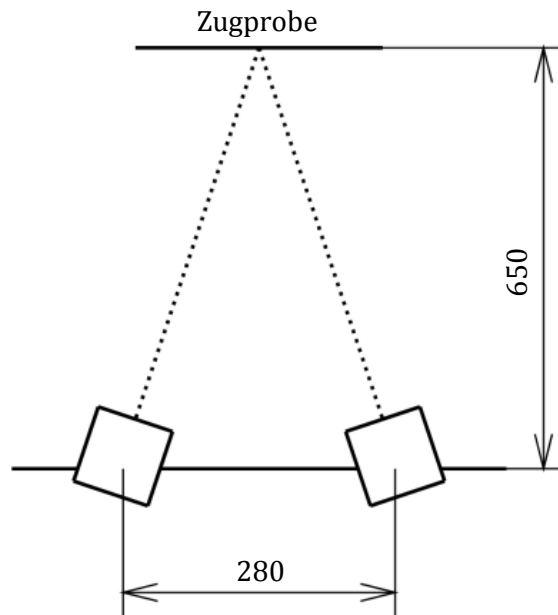


Abbildung 6.3: Positionierung der Kameras für die Messungen mit ARAMIS

Mit dem in Abbildung 6.3 skizzierten Aufbau der Kameras und Objektiven mit einer Brennweite von 50 mm wird die gesamte Breite der Probe abgebildet. Neben der Reparaturstelle wird somit auch der umgebende Bereich erfasst.

## 6.3 Ergebnisse der Zugversuche

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Zugversuche vorgestellt und erste Erkenntnisse abgeleitet. Dabei wird zuerst auf die Festigkeiten der Proben eingegangen und anschließend die punktuellen und flächigen Dehnungsmessungen ausgewertet. Abschließend werden noch die Versagensbilder der Proben analysiert. Eine ausführlichere Diskussion mit einem Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse findet sich in Kapitel 7.

### 6.3.1 Festigkeiten der Zugproben

Das Ziel des Einsatzes von lagenvariablen Schäftungen ist es, die Festigkeit von geschäfteten Reparaturen zu steigern. In Abbildung 6.4 sind die im Zugversuch ermittelten Versagensspannungen der untersuchten Proben aufgetragen.

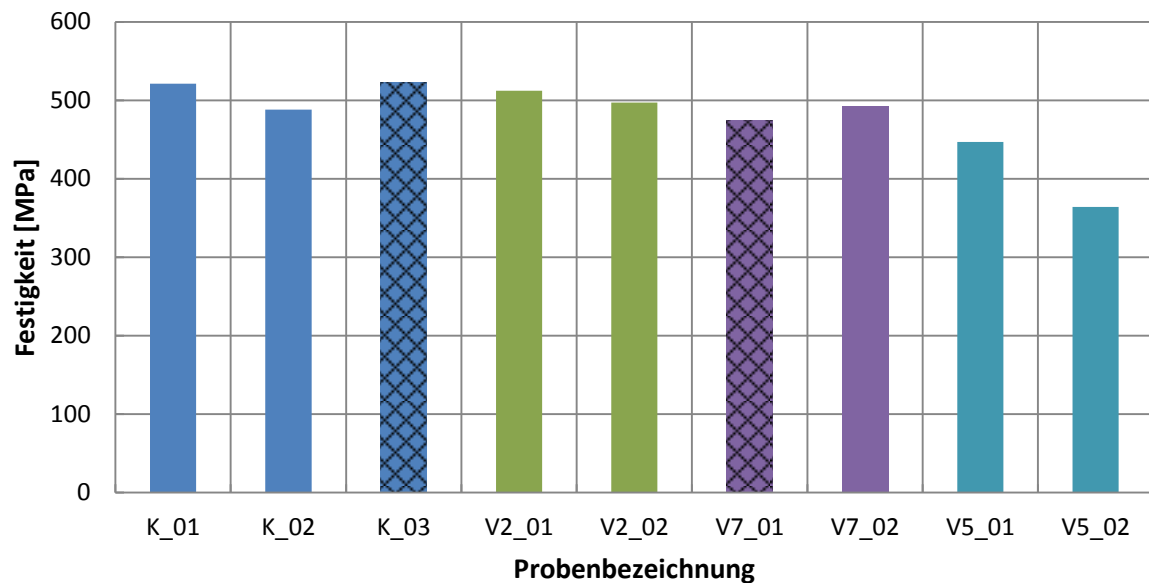


Abbildung 6.4: Übersicht über die Festigkeiten der Zugproben

Die Festigkeiten der Proben K\_03 und V7\_01 sind mit einer Kreuzschraffur markiert, da diese nicht in der Reparaturstelle, sondern an der Einspannung versagt haben. Daher können sie nicht zur Auswertung herangezogen werden. Das dabei aufgetretene Versagensbild ist in Abbildung 6.5 gezeigt.

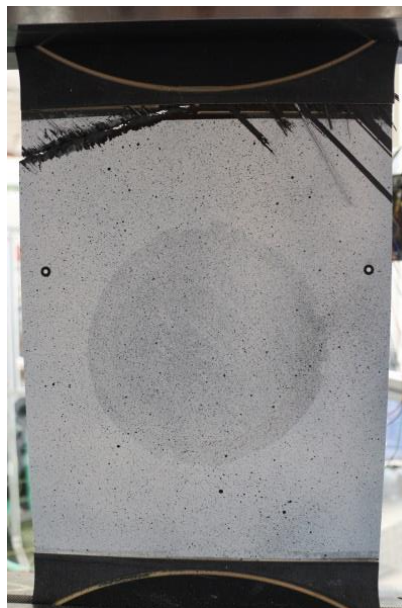


Abbildung 6.5: Versagensbild der Probe V7\_01

Deutlich ist in Abbildung 6.4 zu sehen, dass die Versagensspannungen der Proben mit konstantem und variablem Schäftwinkel der Geometrien V2 und V7 dicht beieinander liegen und die Festigkeit bei reduzierter Schäftlänge signifikant abnimmt. Aufgrund des kleinen Umfangs des Prüfprogramms kann keine statistische Auswertung der Festigkeitswerte erfolgen, daher wird im Folgenden nur eine qualitative Bewertung der Unterschiede der Festigkeiten vorgenommen. Dazu sind in Abbildung 6.6 die prozentualen Abweichungen der Versagensspannungen von dem Mittelwert der Proben K\_01 und K\_02 (504,5 MPa) aufgetragen.

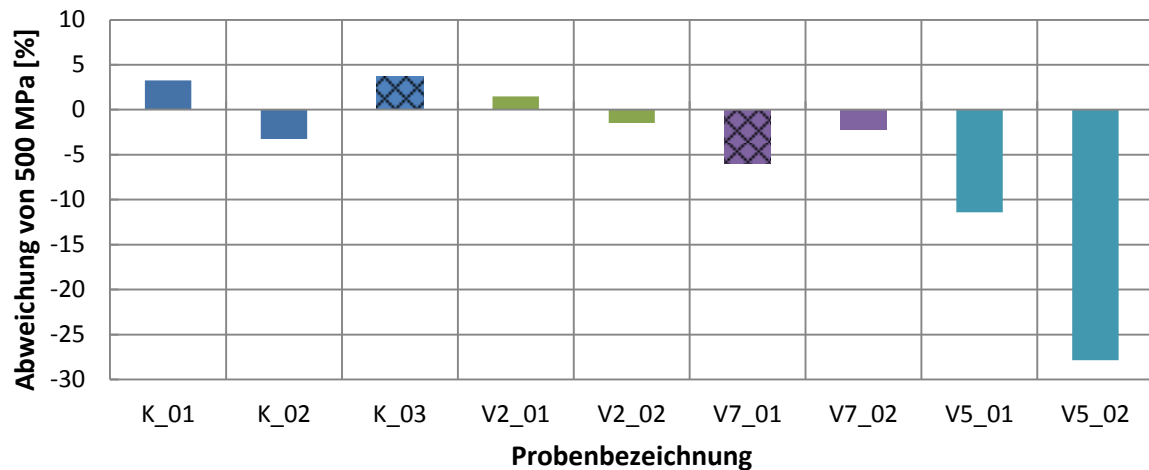


Abbildung 6.6: Übersicht über die Abweichungen der Festigkeiten von 504,5 MPa

An den Festigkeitswerten der drei Schäftungen mit konstantem Schäftwinkel sieht man, dass die Abweichungen bei gleicher Konfiguration bis zu 3 % betragen können und somit beim Vergleich der unterschiedlichen Schäftgeometrien als nicht signifikant angesehen werden können. Wie in Abschnitt 6.3.2 noch erläutert wird, hat die Probe K\_02 das gleiche Versagensbild wie die Probe K\_01. Daraus lässt sich der Unterschied der erreichten Festigkeiten nicht ableiten. Eine mögliche Ursache für die verringerte Festigkeit liegt in der Fertigungsqualität. So mussten die in dem Preforming-Tool vorbereiteten Patches blind in die Schäftungen der Zugproben eingelegt werden. Dieser Punkt wurde bereits in Abschnitt 5.3.3 angesprochen. Zur Bewertung der dabei erreichten Fertigungsgenauigkeit müssten Mikroskopuntersuchungen im Anschluss an die Zugversuche durchgeführt werden. Da das entsprechende Mikroskop zur Zeit der Auswertung der experimentellen Ergebnisse allerdings nicht zur Verfügung stand, kann hier keine Beurteilung der Fertigungsqualität vorgenommen werden.

Der Vergleich der prozentualen Abweichungen der erreichten Festigkeiten von 504,5 MPa der Zugproben mit lagenvariabler Schäftung nach V2 und V7 zeigt, dass diese deutlich unter der Grenze von 3 % bleiben. Nur die Probe V7\_01 weicht stärker ab, allerdings ist das Versagen hier an der Einspannung eingetreten. Aus diesen Daten kann abgeleitet werden, dass die untersuchten Reparaturen mit lagenvariablem Schäftwinkel keine höhere Festigkeit aufweisen als diejenigen mit konstanter Schäftung mit gleicher Schäftlänge. In Abschnitt 4.5.3 wurde gezeigt, dass bei der Schäftung mit der Geometrie V2 an den Knicken der Schäftkontur Spannungsspitzen auftreten. Um diese zu vermeiden, wurde die Geometrie V7 entwickelt. In den Ergebnissen der Zugproben zeigt sich allerdings, dass die Spannungsspitzen entweder auf rein numerische Effekte zurückzuführen sind, oder auftreten, aber nicht versagenskritisch sind.

Mit der Reduzierung der Schäftlänge bei Geometrie V5 sinkt die Festigkeit deutlich ab. Der Unterschied zwischen den beiden Proben ist vermutlich auf Fehlstellen in der Klebschicht zurückzuführen, auf die noch in Abschnitt 6.3.2 eingegangen wird. Bezogen auf die Geometrie der Schäftung fällt der Festigkeitsabfall gegenüber den größeren Reparaturstellen allerdings geringer aus, als man erwarten könnte. So ist die Länge der zweidimensionalen Schäftgeometrie gegenüber der größeren um 37,5 % und die Fläche der runden Schäftung sogar um knapp 50 % reduziert. Ob sich dieser Effekt auf die lagenvariable Schäftung zurückführen lässt, kann mit den vorliegenden Daten nicht zweifelsfrei beurteilt werden. Dazu würde man eine Reparatur mit

konstanter Schäftung der gleichen Größe benötigen. Die Ergebnisse aus den breiten Zugproben lassen dies aber nicht vermuten.

### 6.3.2 Versagensbilder der Zugproben

Zwei der Zugproben haben im Versuch nicht im Reparaturbereich, sondern an der Einspannung versagt.



Abbildung 6.7: Versagensbild der Zugprobe K\_03 außerhalb der Reparaturstelle

In Abbildung 6.7 sieht man als Beispiel das Schadensbild der Zugprobe K\_03, das mit dem der Probe V7\_02 identisch ist. Gut zu erkennen ist links unten die Bohrung einer Befestigungsschraube. Das legt die Vermutung nahe, dass an dieser Stelle die Presskraft der Spannbacken nicht ausgereicht hat, um eine Beanspruchung auf Lochleibung zu verhindern, wodurch die Probe vorzeitig versagt hat. Interessant ist zudem zu sehen, dass sich im Bereich des Dopplers die oberste 45°-Lage vom Laminat gelöst hat und die darunter liegende 0°-Lage sichtbar ist. Das spricht dafür, dass das Versagen an der 0°-Lage begonnen hat und dann durch das Laminat gewandert ist. Dabei ist der Bruch wahrscheinlich nicht zur nächsten Bohrung gewandert, da in diesem Bereich die Pressung der Spannbacken größer war.

Die Proben, bei denen das Versagen an der Reparatur eingetreten ist, zeigen alle ein ähnliches Versagensbild. Als Beispiel sind in Abbildung 6.8 und Abbildung 6.9 beide Teile der Probe K\_01 dargestellt, da bei den lagenvariablen Schäftungen die Bereiche der 45°- bzw. 90°-Lagen zu klein sind, um gut erkannt werden zu können. Diese zeigen aber prinzipiell das gleiche Bild und sind in elektronischer Form dem Anhang beigelegt.



Abbildung 6.8: Schadensbild am Ausgangslaminat der Probe K\_01



Abbildung 6.9: Schadensbild am Reparaturpatch der Probe K\_01

Beide Abbildungen zeigen gut, dass unterschiedliche Versagensmechanismen auftreten. Zum einen ist im Bereich der  $0^\circ$ - und der  $\pm 45^\circ$ -Lagen ein Versagen der Klebschicht zu erkennen. Dabei verbleibt auf der Seite des Reparaturpatches mehr von dem Klebstoff als an dem Ausgangslaminat. Dies entspricht der Erwartung, da der Patch zusammen mit der Klebung im Co-Bonding ausgehärtet wurde. Daraus folgt, dass diese Verbindung stärker hält als die des Klebstoffs an der gefrästen Oberfläche des Ausgangslaminats. Zum anderen kommt es an den  $90^\circ$ -Lagen zu einem Versagen der gefrästen Lagen des Ausgangslaminats durch Zwischenfaser- und Faserbruch. Dies ist wahrscheinlich auf eine Schwächung des Materials durch Bearbeitung zurückzuführen.

Bei der Auswertung der Festigkeiten ist aufgefallen, dass die Probe V5\_02 eine deutlich geringere Versagenslast aufwies als die Probe V5\_01. Eine mögliche Ursache dafür ist in Abbildung 6.10 zu sehen.



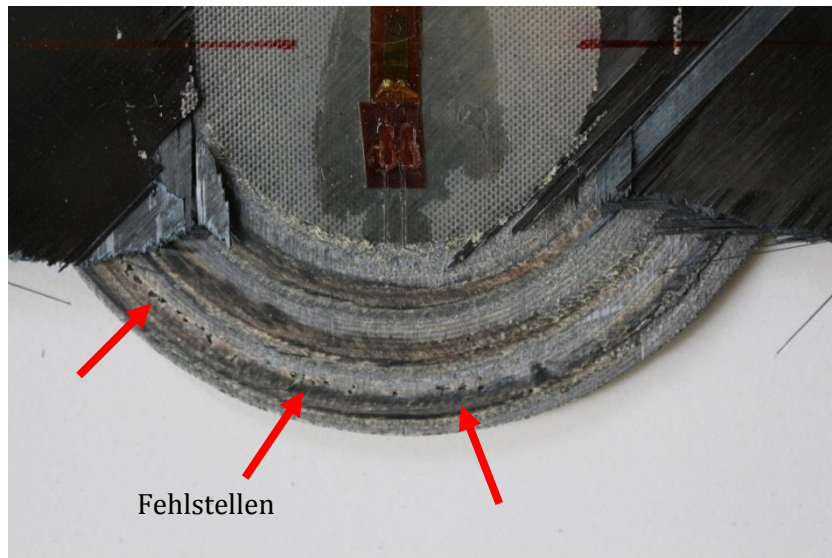


Abbildung 6.10: Versagensbild am Reparaturpatch der Probe V5\_02

Im Bereich der roten Pfeile sind Poren markiert, die Durchmesser von bis zu 1 mm erreichen. Von den anderen untersuchten Proben weist keine ähnlich Fehlstellen auf. Daher ist wahrscheinlich, dass diese Fehlstellen zu einem vorzeitigen Versagen führen können. Dies ist besonders kritisch, da solche Poren offensichtlich auch durch das Kompaktieren der Reparatur im Vakuum über einen langen Zeitraum (mindestens 16 h) nicht zuverlässig vermieden werden können.

### 6.3.3 Gemessene Spannungs-Dehnungs-Kurven an der Prüfmaschine und den DMS

Nachdem gezeigt werden konnte, dass eine lagenvariable Schäftung keinen signifikanten Einfluss auf die Festigkeit einer geschäfteten Reparaturstelle hat, werden nun die Dehnungen der Proben untersucht.

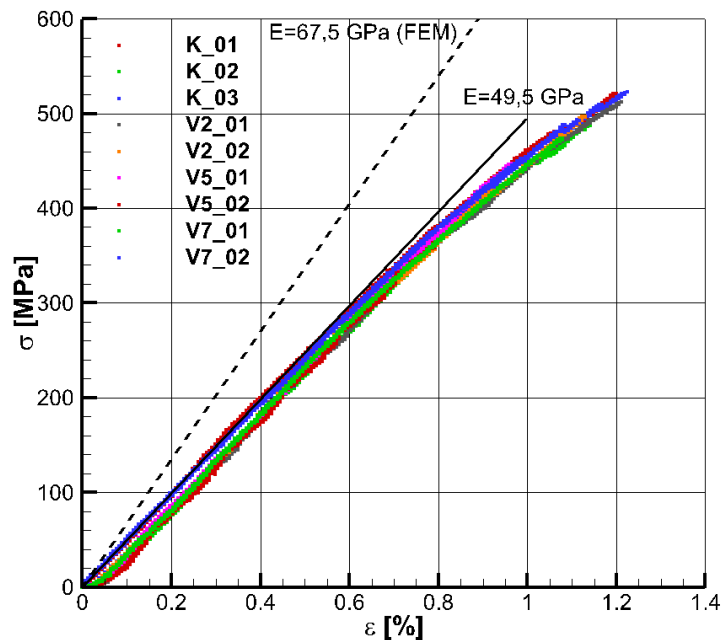


Abbildung 6.11: Spannungs-Dehnungs-Kurve aus den Daten der Prüfmaschine

In Abbildung 6.11 sind die Spannungs-Dehnungs-Kurven aller Zugproben aufgetragen. Dabei zeigt sich, dass alle Proben die gleiche Steifigkeit von knapp 50 GPa aufweisen und auch der Bereich des linearen Materialverhaltens bis rund 300 MPa beziehungsweise 0,6 % Gesamtdehnung nahezu identisch ist. Im Vergleich mit den in der numerischen Simulation bestimmten Spannungs-Dehnungs-Kurven fällt allerdings auf, dass zum einen die im Experiment ermittelte Anfangssteifigkeit über 25 % niedriger ist. Zum anderen ist in den berechneten Spannungs-Dehnungs-Kurven das deutliche Abweichen von dem linearen Verlauf nicht zu finden. Um mögliche Erklärungen für diese Abweichungen zu finden, werden im Folgenden die mit den DMS aufgezeichneten Dehnungen mit den aus den Kräften der Zugmaschine ermittelten Spannungen aufgetragen.

Im ersten Schritt wird in Abbildung 6.12 das Verhalten des unbeschädigten Laminats gezeigt. Hier ist auf der einen Seite zu sehen, dass die an dieser Stelle ermittelte Steifigkeit von rund 65 GPa um weniger als 4 % von der numerisch berechneten Steifigkeit der Gesamtprobe abweicht. Auch das nahezu lineare Verhalten bis zum Bruch wird gut abgebildet. An dieser Stelle stimmen Simulation und Experiment somit gut überein.



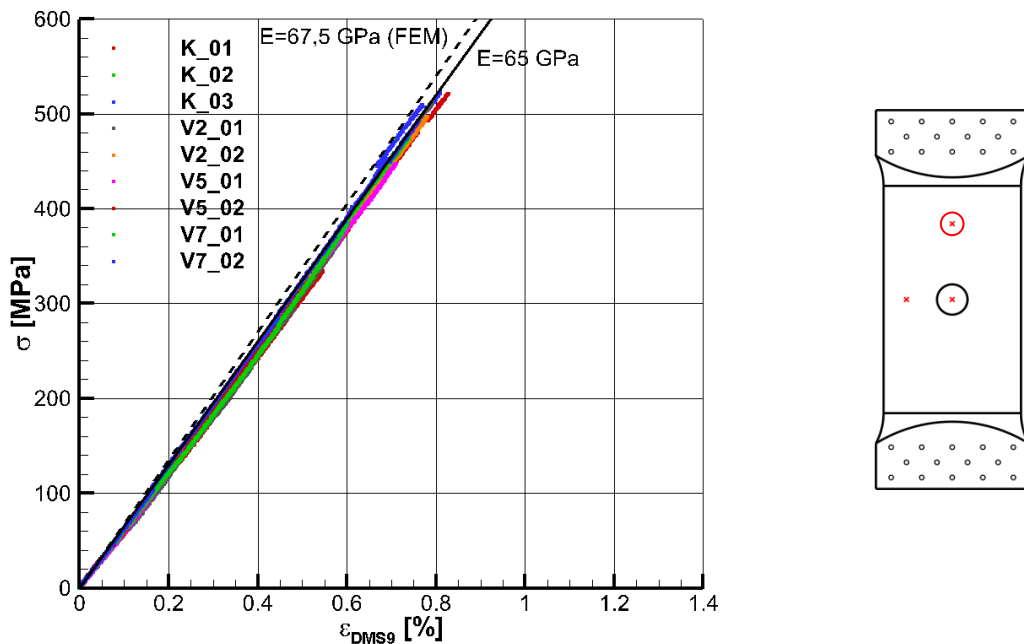


Abbildung 6.12: Spannungs-Dehnung-Kurve gemessen am DMS vor der Reparatur

Im nächsten Schritt wird das Verhalten der Probe in und neben der Reparaturstelle untersucht. Es wurde bereits gezeigt, dass das Verhalten des unbeschädigten Laminats von der Simulation gut wiedergegeben wird, das Verhalten der Gesamtprobe hingegen nicht. Daher liegt die Vermutung nahe, dass es bei der Simulation der Reparaturstelle zu Fehlern kommt.

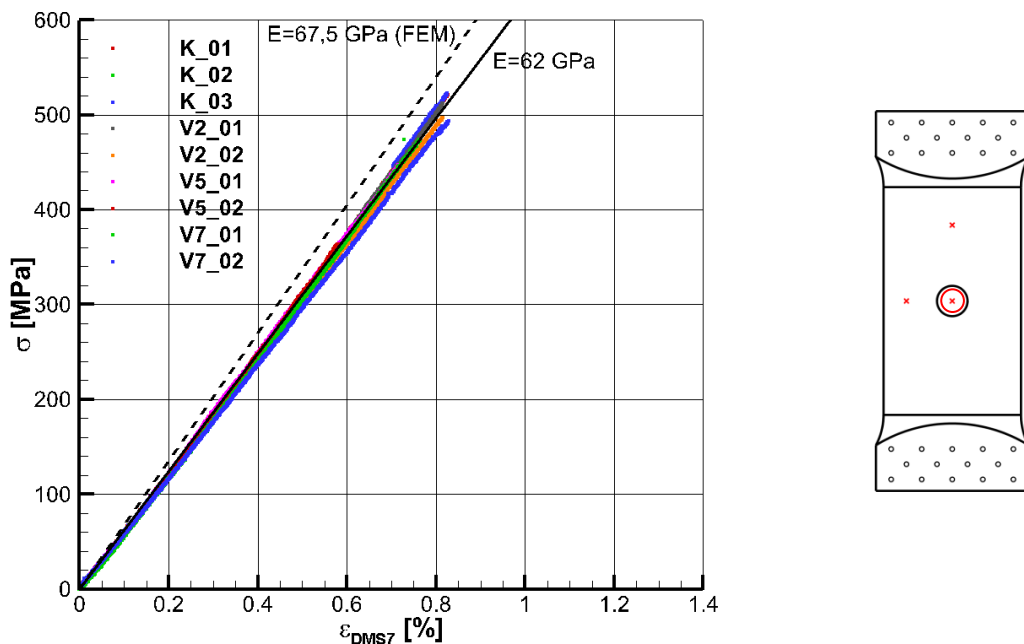


Abbildung 6.13: Spannungs-Dehnungs-Kurve gemessen am DMS im Patch

In Abbildung 6.13 ist die mit dem mittig in der Reparaturstelle positionierten DMS gemessene Dehnung aufgetragen. Wie bereits im unbeschädigten Laminat zeigt sich auch hier eine gute Näherung der Steifigkeit und des nahezu linearen Verhaltens bis zum Bruch mit einer

Abweichung von rund 10 %. Daraus lässt sich schließen, dass auch das Verhalten in der Reparaturstelle von der Simulation richtig abgebildet wird. Die einzige Auffälligkeit besteht darin, dass die Steifigkeit etwas niedriger liegt als im unbeschädigten Laminat. Dieser Effekt lässt sich aber mit der Verteilung der Lasten in der Probe in und um die Reparaturstelle herum erklären. Dafür ist in Abbildung 6.14 die Spannungs-Dehnungs-Kurve mit der neben der Reparatur gemessenen Dehnung aufgetragen. Hier liegt die ermittelte Steifigkeit rund 5 % höher als im unbeschädigten Laminat. Somit ist die Dehnung bei gleicher an der Probe anliegender Prüfkraft in der Reparatur höher als daneben. Das spricht dafür, dass der Traganteil der Reparatur in diesem Querschnitt höher ist als der des umgebenden Laminats. Hierauf wird noch genauer im folgenden Abschnitt 6.3.4 eingegangen.

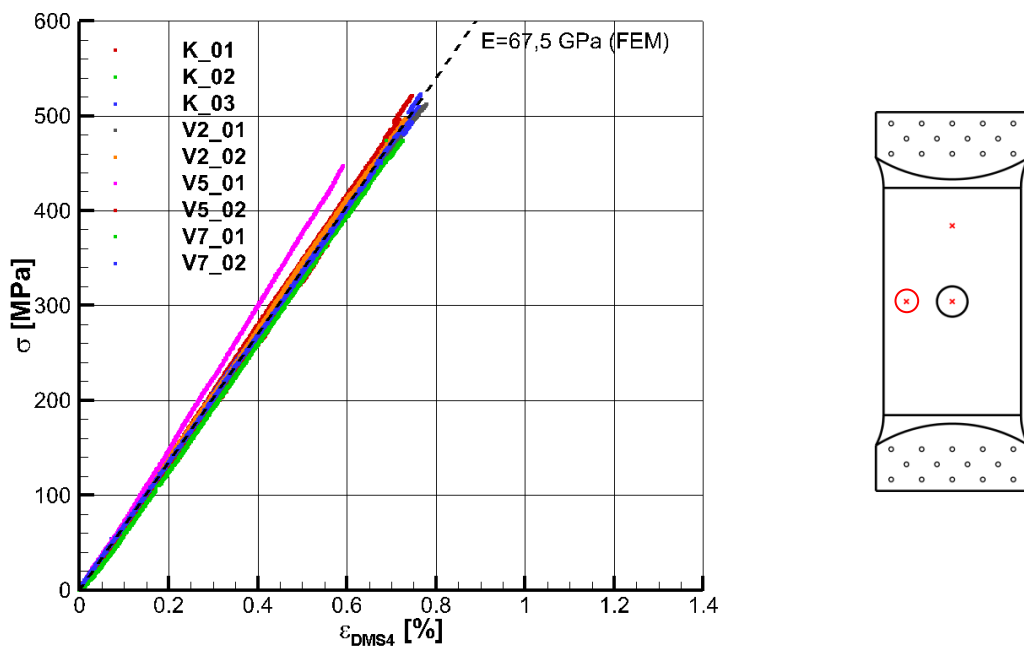


Abbildung 6.14: Spannungs-Dehnungs-Kurve gemessen am DMS neben der Reparaturstelle

In Abbildung 6.14 ist zudem zu sehen, dass bei der Probe V5\_01 eine rund 10 % höhere Steifigkeit ermittelt wurde. Da sich dies allerdings weder an den anderen Messstellen noch in den an der Prüfmaschine aufgezeichneten Daten zeigt, kann vermutlich von einem fehlerhaften DMS ausgegangen werden.

In diesem Abschnitt wurden zuerst die an der Prüfmaschine und anschließend die mit den Messdaten der DMS ermittelten Spannungs-Dehnungs-Kurven präsentiert. Dabei zeigt sich in den Daten der DMS eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Simulationen. Der Grund für die Abweichungen der globalen Messdaten von den Simulationen liegt vermutlich im Verhalten der GFK-Doppler. Im Zugversuch konnte ab einer Prüfkraft von 50 bis 100 MPa akustisch das schrittweise Lösen der Verklebung zwischen dem 1 mm-Doppler und dem CFK-Laminat registriert werden. Dieses Versagen wird an der Klebekante des Dopplers zuerst in der Mitte der Probe sichtbar und breitet sich dann nach außen aus. In Abbildung 6.15 ist zu sehen, wie die Doppler am Ende der Prüfung außerhalb der Spannbacken vollständig abgelöst sind.

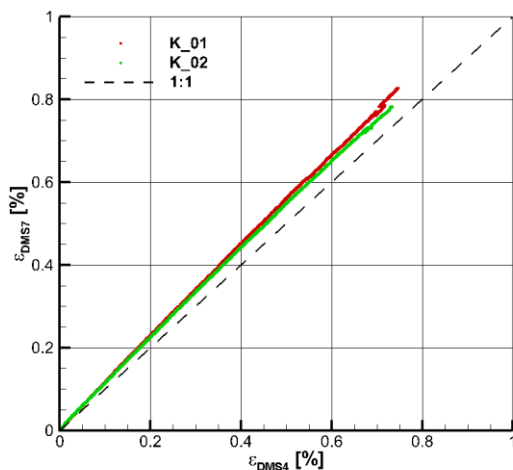


Abbildung 6.15: Abgelöster GFK-Doppler

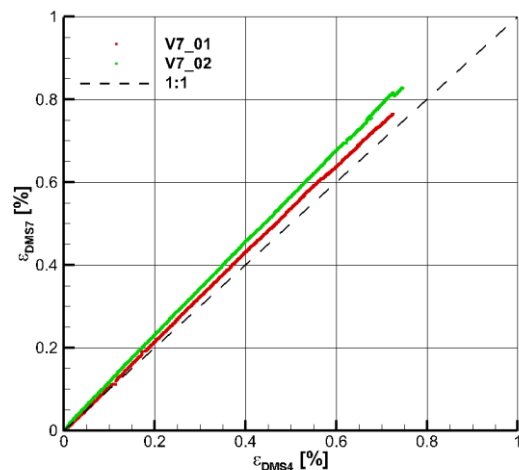
Eine detailliertere Diskussion möglicher Ursachen und Maßnahmen zur Vermeidung folgt im anschließenden Kapitel 7.

### 6.3.4 Mit DMS gemessene Dehnungsverteilung in der Probe

Mit den im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Messergebnissen konnte gezeigt werden, dass im Querschnitt der Reparaturstelle die Lastverteilung nicht gleichmäßig ist.



(a) konstante Schäftung



(b) variable Schäftung nach Geometrie V7

Abbildung 6.16: Gemessene Längsdehnungen im Patch und neben der Reparaturstelle

In Abbildung 6.16 sind die in und neben der Reparatur gemessenen Längsdehnungen gegeneinander aufgetragen. Hier zeigt sich, wie schon zuvor die rund 10 % höhere Dehnung in der Reparaturstelle. Dies deckt sich schlüssig mit den in Abschnitt 2.3.3 vorgestellten Simulationsergebnissen zur Konfiguration der GFK-Doppler. Dass sich diese Dehnungsverteilung auch nach dem Ablösen der Doppler nicht ändert, liegt wahrscheinlich

daran, dass die Pressung in der Mitte der Spannbacken am größten ist. Dadurch werden dort die größten Kräfte eingeleitet.

### 6.3.5 Mit DMS gemessene Querdehnung

Neben der Reparaturstelle waren zwei DMS zur Messung der Längs- als auch Querdehnung positioniert. Daraus kann abgeleitet werden, wie die dreidimensionale Beanspruchung der Schäftung bei einer einachsigen Belastung aussieht. Daraus lassen sich später Ansätze zur Gestaltung von dreidimensionalen Reparaturstellen gewinnen, die nicht über eine einfache Rotation von einer zweidimensionalen Schäftungsgeometrie abgeleitet werden. Dies ist allerdings nicht Teil dieser Arbeit, daher werden die Messergebnisse nur kurz vorgestellt.

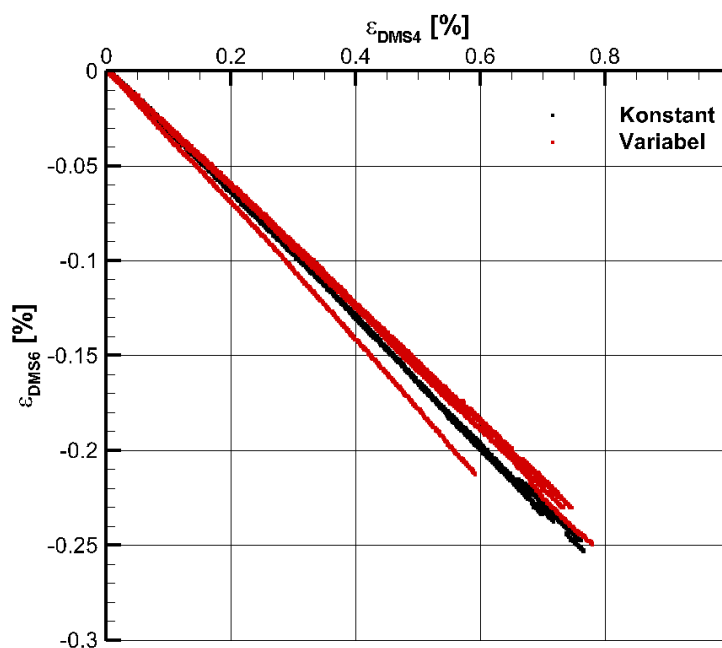


Abbildung 6.17: Mit DMS gemessene Querdehnungen aufgetragen über Längsdehnung

In Abbildung 6.17 ist gut zu erkennen, dass sich die Längs- und Querdehnung bis zum Bruch bei allen Geometrien nahezu linear verhalten. Wie zuvor bereits diskutiert, kann bei der Probe V5\_01 die Messung der Längsdehnung ausgeblendet werden. Die Querdehnung liegt allerdings in der gleichen Größenordnung wie bei den anderen Proben, was noch einmal dafür spricht, dass die Messung der Längsdehnung fehlerhaft ist. Interessant ist in Abbildung 6.17 weiterhin zu sehen, dass die Querdehnungen der Proben mit konstanter Schäftung größer sind als die der variablen Schäftungen. Dieser Einfluss sollte bei der Gestaltung komplexerer dreidimensionaler Reparaturstellen berücksichtigt werden. Eine Erklärung für diesen Effekt wird im folgenden Abschnitt bei der Auswertung der flächigen ARAMIS-Messungen gegeben.

### 6.3.6 Mit ARAMIS gemessene Dehnungsverteilung in der Probe

Zusätzlich zu den punktuellen Dehnungsmessungen mit den DMS wurde die Vorderseite der Probe optisch mit dem ARAMIS-System aufgenommen. Die dabei berechneten Dehnungsverteilungen werden nun vorgestellt und mit den punktuellen Messungen verglichen.

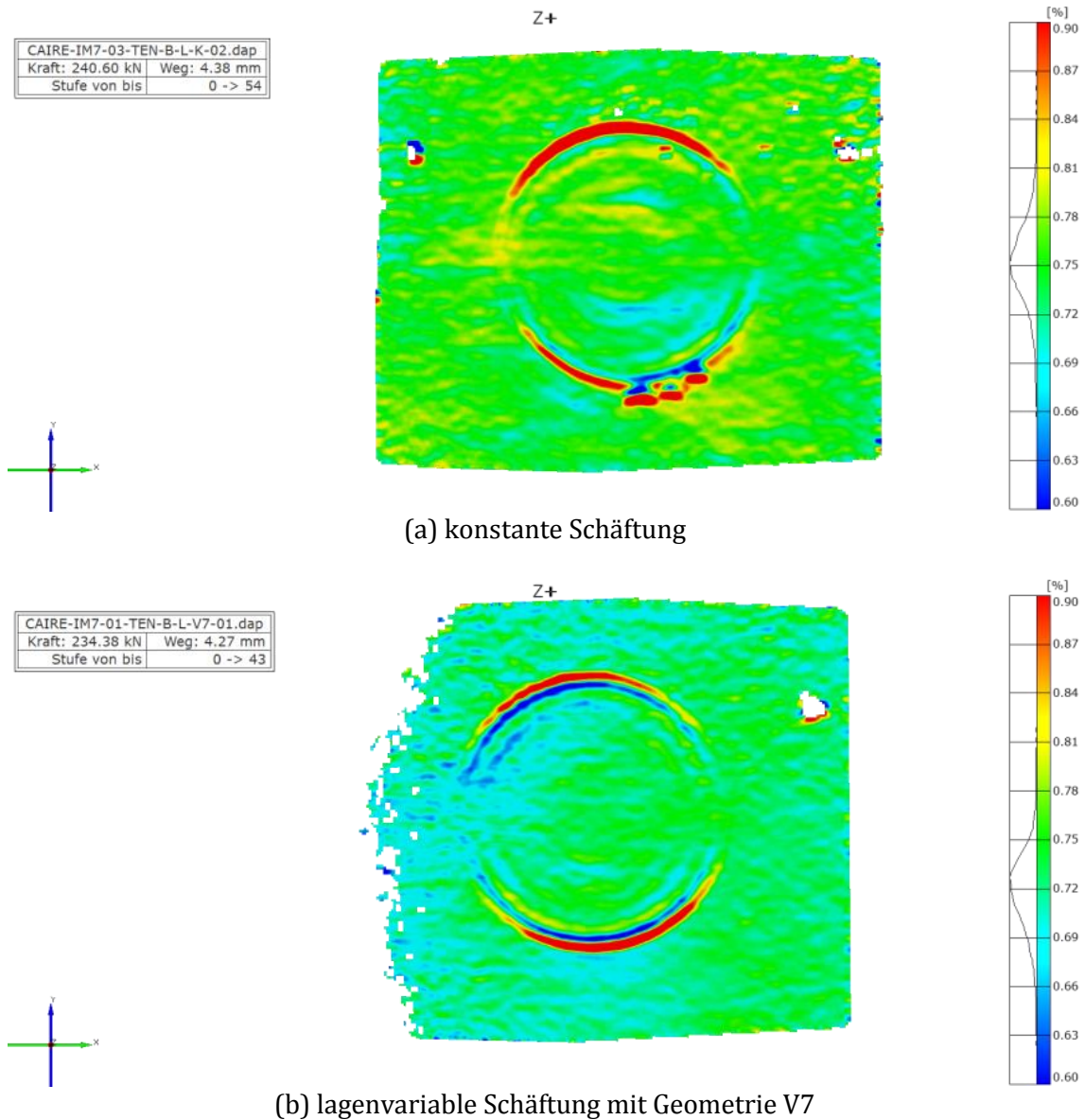


Abbildung 6.18: Mit ARAMIS gemessene Längsdehnung bei zwei Proben mit konstantem und lagenvariablem Schäftwinkel vor Versagen der Probe

In Abbildung 6.18 (a) und (b) sind beispielhaft die Verteilungen der Längsdehnung bei jeweils einer Probe mit konstantem und variablem Schäftwinkel nach der Geometrie V7 abgebildet. Gut zu sehen sind die Ränder des Reparaturpatches mit einer relativ großen Dehnung der obersten 45°-Lagen, die in der Belastungsrichtung der Probe eine geringere Steifigkeit aufweisen als das Gesamtlaminat. Vor allem in Abbildung 6.18 (b) ist die darunter folgende 0°-Lage an der geringeren Dehnung zu erkennen. Diese wird durch einen Steifigkeitssprung in der Reparaturstelle hervorgerufen. In Abbildung 6.19 ist skizziert, wie die Lagen in der Reparaturstelle positioniert sind. Dabei wird deutlich, dass es zwischen Position 1

und 2 zu einer Steifigkeitserhöhung kommt, da die eingebrachte  $0^\circ$ -Reparaturlage hinzukommt. Zwischen Position 2 und 3 nimmt die Steifigkeit des gesamten Verbunds wieder ab, da die geschäftete  $0^\circ$ -Lage des Ausgangslaminats stetig dünner wird. Der Effekt der Steifigkeitserhöhung ist bei der Probe mit variablem Schäftwinkel stärker ausgeprägt, da hier der Schäftwinkel der  $0^\circ$ -Lage deutlich flacher ist.

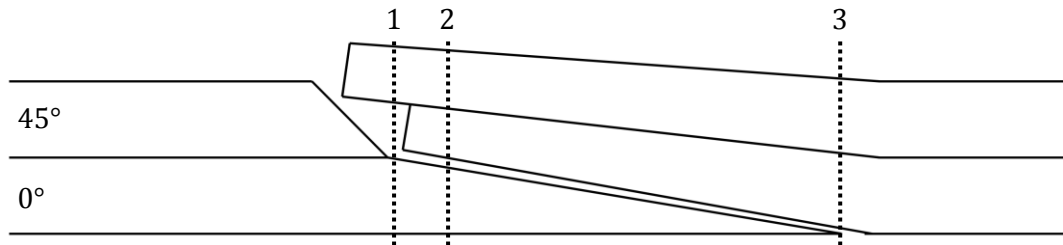


Abbildung 6.19: Skizze der Lagenpositionen in der Reparaturstelle

Weiter innen in der Reparaturstelle sind die Wechsel zwischen den Lagen zunächst zwar noch zu erkennen, allerdings in deutlich schwächerer Ausprägung. Das liegt daran, dass die oberen Lagen wie ein Filter wirken, in dem die direkt an der Schäftung auftretenden Dehnungsunterschiede angeglichen werden.

In den Messergebnissen mit den DMS hat die Auswertung bei der Querkontraktion ergeben, dass diese an der Position des DMS bei den lagenvariablen Schäftungen stärker ausgeprägt ist, als bei den konstanten Schäftungen. Dies zeigt sich auch bei den ARAMIS-Messungen in Abbildung 6.20.

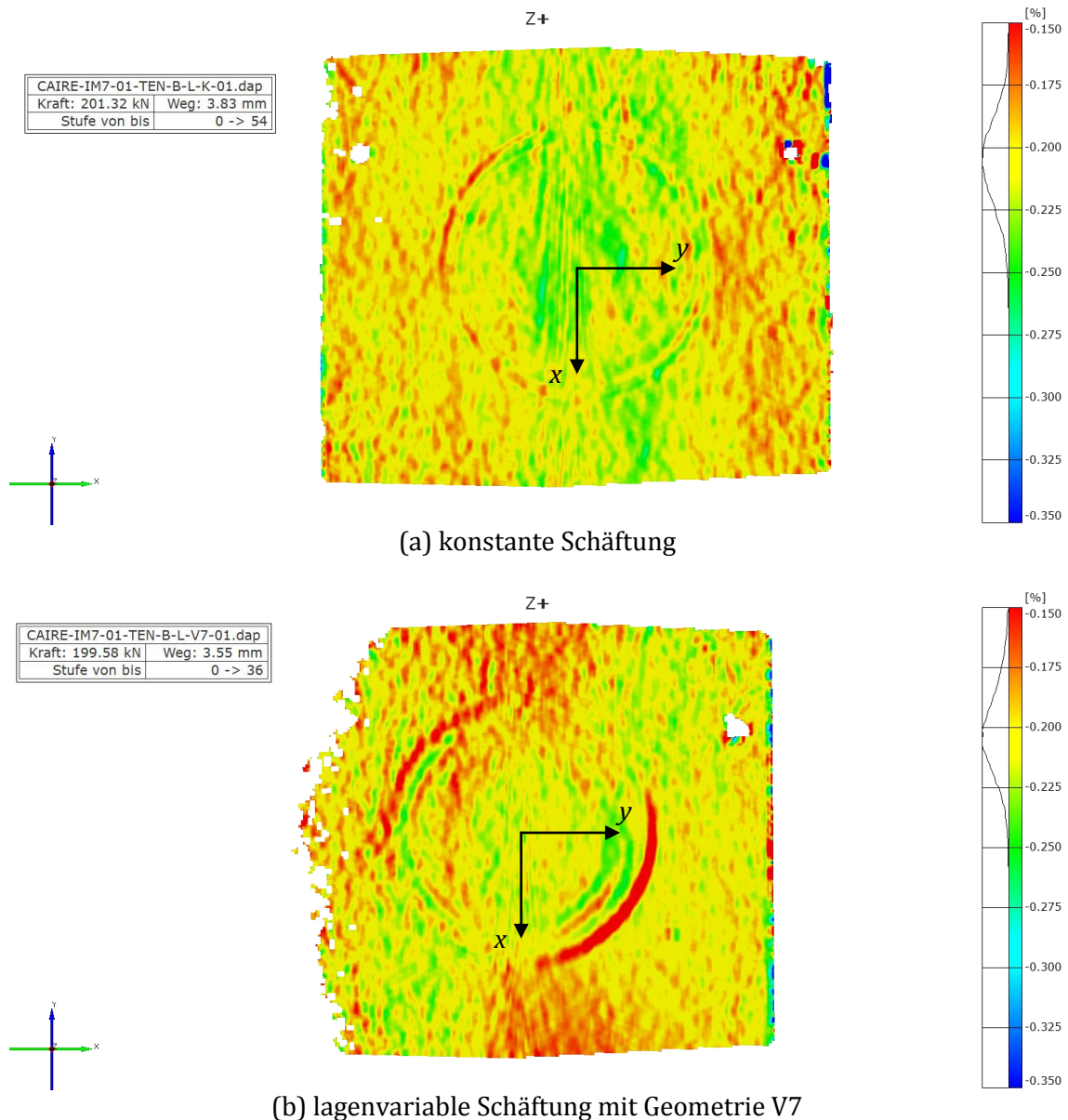


Abbildung 6.20: Mit ARAMIS gemessene Querdehnung bei zwei Proben mit konstantem und lagenvariablem Schäftwinkel vor Versagen der Probe

Dabei ist zu erkennen, dass die Probe mit konstanter Schäftung bei gleicher Belastung neben der Reparaturstelle eine knapp 10 % höhere Querdehnung aufweist als die Probe mit lagenvariabler Schäftung. In der Mitte der Proben liegt hingegen der umgekehrte Fall vor. Dies ist vermutlich auf die Steifigkeit der Reparatur zurückzuführen. Bei der konstanten Schäftung weisen die 90°-Lagen im Schnitt mit  $x = 0$  einen deutlich flacheren Schäftwinkel auf, als bei der variablen Schäftung (2,86° gegen 13,5°). Daraus folgt, dass bei der variablen Schäftung der Traganteil der 90°-Lagen an der Querdehnung geringer ist, als bei der konstanten Schäftung. Die dadurch stärker belasteten 0°- und  $\pm 45^\circ$ -Lagen weisen allerdings eine geringere Steifigkeit bezüglich der Querbeanspruchung auf. Durch diese herabgesetzte Steifigkeit in der Reparatur wird das Ausgangslaminat im Schnitt mit  $y = 0$  bei der lagenvariablen Reparatur stärker belastet und weist somit eine höhere Querdehnung auf. Da die Querdehnung der Proben an der Einspannung jedoch behindert wird, kommt es bei den Proben mit variablem Schäftwinkel in den Außenbereichen zu einer reduzierten Querdehnung.

Dies ist allerdings ein Effekt, der nur in den Messergebnissen zu sehen ist. In der numerischen Simulation der Zugprobe tritt dies nicht auf. Somit liefert die Simulation nur unzureichende Daten für die Erstellung von komplexen dreidimensionalen Schäftreparaturen.

Inwiefern die Unterschiede in der Querdehnung zwischen den Proben mit konstanter und lagenvariabler Schäftung einen Einfluss auf die Festigkeit der Reparaturstelle haben, kann mit den in dieser Arbeit aufgenommenen Daten nicht beurteilt werden. Dazu muss zunächst das Querdehnungsfeld auf der Probe bei den unterschiedlichen Schäftgeometrien genauer vermessen werden. Anschließend können numerische Simulationen durchgeführt werden, in denen nur ein kleiner Bereich um die Reparaturstelle modelliert wird. Auf diesen können dann die im Versuch ermittelten Dehnungsverteilungen aufgebracht werden.



## 7 Diskussion

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die Ergebnisse der numerischen und der experimentellen Untersuchungen vorgestellt wurden, sollen im Folgenden noch ungeklärte Fragen diskutiert werden. Dabei werden die numerischen und die experimentellen Ergebnisse direkt gegenübergestellt und miteinander verglichen.

Zuerst wird darauf eingegangen, dass sich in den Experimenten, im Gegensatz zu der numerischen Untersuchung, keine Festigkeitssteigerung gezeigt hat. Anschließend werden mögliche Ursachen und Ansätze zur Vermeidung des Ablösens der GFK-Doppler von dem CFK-Laminat präsentiert.

### 7.1 Vergleich der experimentell ermittelten Festigkeiten mit der Simulation

Aus den Zugversuchen mit den Proben mit konstanter und variabler Schäftung konnte keine Festigkeitssteigerung der Reparaturen abgeleitet werden. Dies steht im Widerspruch zu den Ergebnissen der numerischen Untersuchungen. Dabei konnte gezeigt werden, dass mit einem variablen Schäftwinkel die in der Klebschicht auftretenden Spannungsspitzen um bis zu 50 % reduziert werden. In Kapitel 4 wurde allerdings nur der Bereich des linearen Werkstoffverhaltens der Klebschicht vorgestellt. Bei den experimentellen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die breiten Proben alle bei einer Gesamtdehnung von rund 0,8 % in der Klebschicht versagen. In Abbildung 7.1 sind die numerisch berechneten Spannungsverläufe in der Klebschicht der konstanten und der variablen Schäftung mit der Geometrie V7 bei einer Gesamtdehnung der Probe von 0,81 % aufgetragen. Hieraus lassen sich Erkenntnisse über das Versagensverhalten in der Klebschicht ableiten.

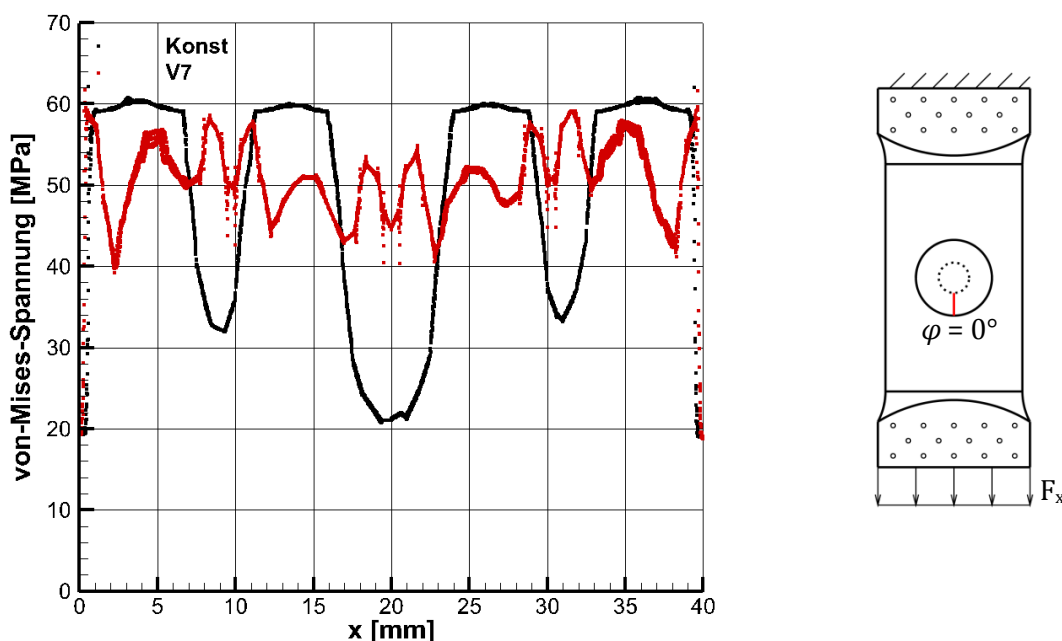


Abbildung 7.1: Numerisch berechneter Von-Mises-Spannungsverlauf in der Klebschicht beim Versagensschritt im Zugversuch für die konstante und variable Schäftung mit Geometrie V7 ( $\varepsilon = 0,81 \%$ )

Man kann gut sehen, dass bei der konstanten Schäftung weite Bereiche der Klebschicht ihre maximale Spannung erreicht haben und eine plastische Verformung zeigen. Bei der lagenvariablen Schäftung hingegen hat der Klebstoff diesen Bereich des Werkstoffverhaltens noch nicht erreicht, liegt allerdings kurz davor. Aus dem Vergleich der Spannungsverläufe lässt sich ableiten, dass wahrscheinlich bei der konstanten Schäftung die im Bereich der  $0^\circ$ -Lagen auftretenden Spannungsspitzen, anders als ursprünglich angenommen, nicht direkt Versagensinitiiierend sind. Stattdessen kommt es beim Erreichen der maximal übertragbaren Spannungen zu einer Umlagerung der Lasten in die angrenzenden Bereiche, wodurch das lokale Versagen der Verbindung verhindert wird. Dies lässt sich auch an dem Materialverhalten des Klebstoffs erklären. Beim Erreichen der maximalen Spannung kann dieser bis zum Bruch noch plastische Dehnungssteigerungen ertragen. Dadurch, dass in der Klebschicht die benachbarten Bereiche aber noch unter der maximalen Spannung liegen, steigt die Dehnung in der Klebschicht aber weiterhin nur langsam.

Bei der lagenvariablen Schäftung hingegen liegen alle Bereiche auf einem ähnlichen Spannungsniveau. Daher ist die Möglichkeit, durch lokale plastische Verformungen des Klebstoffs die Beanspruchung in andere Bereiche umzulagern, weniger stark ausgeprägt.

Zur Überprüfung dieser These könnte man lagenvariable Schäftgeometrien entwerfen, die im Bereich der  $0^\circ$ -Lagen einen etwas steileren Schäftwinkel aufweisen als im Bereich der  $\pm 45^\circ$ - und  $90^\circ$ -Lagen. Wenn diese eine ähnliche Festigkeit aufweisen wie die Schäftung mit konstantem Winkel, würde dies das hier diskutierte Versagensmodell bestätigen.

In vorangegangenen und parallelen Untersuchungen an 2D-Couponproben konnte nachgewiesen werden, dass eine lagenvariable Schäftung zu einer Festigkeitssteigerung führen kann [4], [14]. Dass sich diese bei den hier untersuchten 3D-Reparaturproben experimentell nicht gezeigt hat, kann ebenfalls mit dem zuvor erläuterten Modell der Lastumlagerung erklärt

werden. In den 2D-Couponproben liegt über der Probenbreite eine näherungsweise konstante Lastverteilung in der Klebschicht vor. Bei den 3D-Reparaturproben hingegen nehmen die Spannungen vom 0°-Schnitt in Umfangsrichtung ab. Demensprechend kann eine Lastverteilung quer zur Belastungsrichtung erfolgen, während dies bei den 2D-Couponproben hauptsächlich in Belastungsrichtung möglich ist. Es steht somit ein größerer Bereich zur Lastumlagerung zur Verfügung.

Eine weitere mögliche Erklärung für die ausbleibende Festigkeitssteigerung bei den lagenvariablen Schäftungen liegt in der Fertigungsqualität. Hier können zum einen Fehler in der Positionierung und Ausrichtung der Reparaturlagen und zum anderen eine ungleichmäßige Klebschichtdicke die Festigkeit herabsetzen. Zur Auswertung dieser Punkte müssten an den getesteten Zugproben in verschiedenen Schnitten der Klebschicht Mikroskopuntersuchungen durchgeführt werden. Zum Zeitpunkt dieser Arbeit stand allerdings kein entsprechendes Gerät zur Verfügung. Daher kann der Einfluss der Fertigungsqualität an dieser Stelle nicht beurteilt werden.

Darüber hinaus wurde mit den ARAMIS-Messungen gezeigt, dass die Querdehnungen in der Probe von der Simulation nur unzureichend abgebildet werden. Ob diese die Spannungsverteilung in der Klebschicht allerdings ausreichend beeinflussen, dass ein vorzeitiges Versagen eintritt, kann an dieser Stelle nicht bewertet werden.

## 7.2 Ablösung der GFK-Doppler im Zugversuch

In den Zugversuchen hat sich gezeigt, dass sich die Klebverbindung zwischen dem 1 mm-Doppler und dem CFK-Laminat unter Belastung außerhalb der Spannbacken löst. Das Versagen beginnt dabei immer in der Mitte der Probe und wandert anschließend nach außen.

Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten liegt in dem Aufbau des 1 mm-Dopplers. Dieser ist aus 2 Lagen mit  $\pm 45^\circ$  Faserrichtung und somit nicht symmetrisch aufgebaut. Eine Zugbelastung eines solchen Laminats führt durch die Belastungs-Verformungs-Kopplung zu einer Torsion, die als Schälbeanspruchung auf die Klebung zwischen dem Doppler und dem CFK-Laminat wirkt. In diesem Fall müsste das Versagen der Klebung allerdings nicht in der Mitte der Probe, sondern am Rand beginnen. Daher ist diese Ursache unwahrscheinlich.

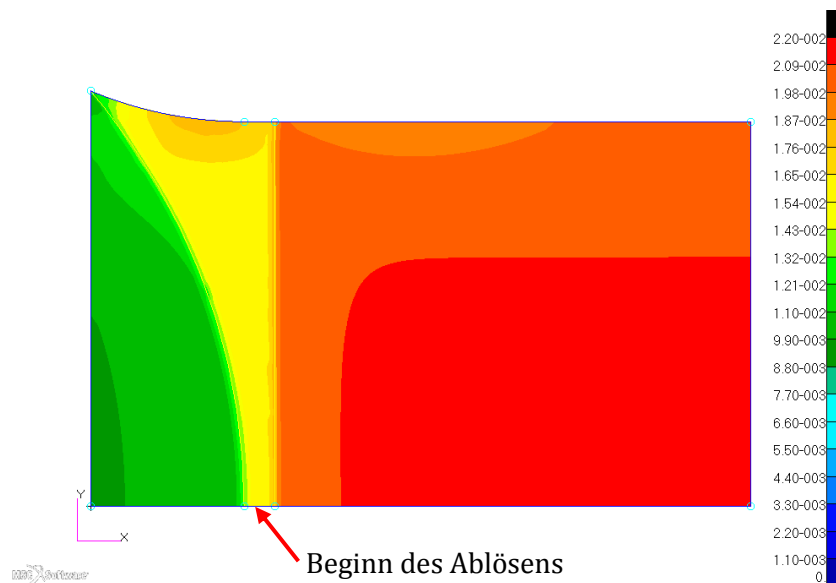


Abbildung 7.2: Numerisch bestimmte Dehnungsverteilung in der Probe ohne Reparaturstelle

Eine weitere mögliche Erklärung liegt in der Kombination des 1 mm- und des 2 mm-Dopplers. Abbildung 7.2 zeigt die Bereiche unterschiedlicher Dehnungen im Bereich der Doppler. Dabei ist gut zu sehen, dass im Mittelschnitt der Probe die Dehnung über eine Strecke von nur 10 mm auf das Doppelte ansteigt. Dies könnte zum Beispiel vermindert werden, indem entweder der 1 mm-Doppler weiter auf die Probe reicht, oder der darüber liegende 2 mm-Doppler auch durch einen mit einer Dicke von 1 mm ersetzt wird. Die Auswirkungen solcher Modifikationen lässt sich allerdings nur in weiteren Zugversuchen zweifelsfrei klären.

Auf der anderen Seite haben die Proben auch mit abgelösten Dopplern zum großen Teil im Bereich der Reparatur versagt. Daher sollte experimentell getestet werden, ob die Doppler zur Reduzierung der Spannungsspitzen im Bereich der Taillierung überhaupt benötigt werden. Dies hätte den Vorteil, dass die Fertigung vereinfacht wird.

## 8 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war, die bereits bei 2D-Couponproben nachgewiesene Möglichkeit zur Steigerung der Festigkeit einer geschäfteten Klebverbindung mit lagenvariablem Schäftwinkel [4] auch bei 3D-Reparaturproben nachzuweisen. Dazu wurde theoretisch mit einer vereinfachten analytischen Spannungsberechnung begonnen, deren Ergebnisse mit denen der zweidimensionalen Untersuchung übereinstimmen. So konnte gezeigt werden, dass mit einem lagenvariablen Schäftwinkel die bei einer Schäftung mit konstantem Winkel auftretenden Spannungsspitzen im Bereich der 0°-Lagen vermieden werden können und die Spannungsverteilung homogener gestaltet wird.

Im zweiten Schritt wurde für eine numerische Simulation der später zu untersuchenden Zugproben ein Finite-Elemente-Modell (FE-Modell) erstellt, welches eine detailliertere Begutachtung der Beanspruchungen in der geschäfteten Klebverbindung einer dreidimensionalen Reparaturstelle ermöglicht. Die dabei gewonnenen Ergebnisse decken sich mit denen der vereinfachten analytischen Berechnung, wobei die Unterschiede schlüssig mit den getroffenen Vereinfachungen erklärt werden können. Somit konnte aus der analytischen und der numerischen Modellierung die Erwartung formuliert werden, dass die Proben mit lagenvariablem Schäftwinkel im Zugversuch eine höhere Festigkeit aufweisen sollten als diejenigen mit konstanter Schäftung.

In den durchgeführten Zugversuchen zeigte sich allerdings, dass die untersuchten Proben mit lagenvariablem Schäftwinkel in etwa die gleiche Festigkeit besitzen wie diejenigen mit konstanter Schäftung. Es konnte auch keine Tendenz zu höheren Festigkeiten festgestellt werden. Da die sonstigen Ergebnisse, wie die Spannungs-Dehnungs-Kurven und die Dehnungsverteilungen über der Probe, bei den numerischen und den experimentellen Untersuchungen konsistent sind, kann davon ausgegangen werden, dass das Verhalten der Proben von dem FE-Modell prinzipiell richtig abgebildet wird. Beim Vergleich der numerisch berechneten Spannungsverläufe in der Klebschicht der unterschiedlichen Schäftgeometrien wurde die These aufgestellt, dass die bei der konstanten Schäftung auftretenden Spannungsspitzen, anders als bisher angenommen, nicht direkt Versagensinitiierend sind. Stattdessen kommt es beim Erreichen der maximal ertragbaren Spannungen zu einer Umlagerung der Lasten in die angrenzenden Bereiche. Bei den Schäftungen mit lagenvariablem Schäftwinkel ist das Spannungsniveau hingegen insgesamt ausgeglichener. Daher kommt es nach dem ersten Erreichen der maximalen Spannungen schneller zu einem Versagen der gesamten Verbindung, weil durch die Lastumlagerung die benachbarten Bereiche ebenfalls an die maximal ertragbare Spannung kommen.



## 9 Ausblick

Zur Überprüfung der aufgestellten These zum Versagensmechanismus der geschäfteten Klebverbindungen sollten im nächsten Schritt wieder 2D-Couponproben untersucht werden. Diese sind zum einen einfacher in größerer Stückzahl herzustellen und können zudem auf einer kleineren Prüfmaschine getestet werden, wodurch der Aufwand verringert wird. Zum anderen liegt dann der Schwerpunkt wieder auf der zweidimensionalen Gestaltung der Schäftung. Wie bereits in Abschnitt 7.1 angesprochen, sollten weiterhin Verbindungen mit konstantem und variablem Schäftwinkel miteinander verglichen werden. Dabei sollten auch Geometrien untersucht werden, die in der Schäftwinkelverteilung nach den analytischen und numerischen Berechnungen zu einer reduzierten Festigkeit führen müssten. Das bedeutet, dass an den 0°-Lagen der Schäftwinkel größer gewählt werden sollte als in den anderen Bereichen. Wenn diese Proben dann immer noch die gleichen Festigkeiten aufweisen, könnte das Verständnis über die Versagensmechanismen von geschäfteten Klebverbindungen überarbeitet werden.

In dieser Arbeit wurden die Reparaturen im Co-Bonding ausgeführt, bei dem das Reparaturmaterial zusammen mit dem Filmklebstoff ausgehärtet wird. Eine mögliche Variation besteht darin, den Reparaturpatch gesondert zu fertigen. Dabei wird dieser nach dem Aushärten wie die Schäftung auf Kontur gefräst. Eventuell lassen sich so fertigungsbedingte Fehler in der Positionierung der Reparaturlagen vermeiden.

Unabhängig davon sollte die Gestaltung der 3D-Reparaturproben vor allem in Hinblick auf die GFK-Doppler überarbeitet werden. Hier können verschiedene Ansätze verfolgt werden, bei denen die Geometrie der Doppler überarbeitet wird, andere Dopplermaterialien zum Einsatz kommen oder die Doppler ganz weggelassen werden.

Auch auf der numerischen Seite kann die Modellerstellung erweitert werden. Hier wäre der nächste Ansatz eine Möglichkeit zu entwickeln, komplexere dreidimensionale Schäftgeometrien zu modellieren. In dem in dieser Arbeit erstellten FE-Modell können nur rotationssymmetrische Schäftungen abgebildet werden und in einem anderen, bereits vorhandenen Modell, komplexe Schäftungsgeometrien mit konstantem Schäftwinkel.





## Literaturverzeichnis

- [1] Sung-Hoon Ahn and George S. Springer. Repair of Composite Laminates. Technical report, Federal Aviation Administration, 2000.
- [2] Keith B. Armstrong, L. Graham Bevan, and William F. Cole. *Care and Repair of Advanced Composites*. SAE International, 2005.
- [3] Aalan Baker, Stuart Dutton, and Donald Kelly. *Composite Materials for Aircraft*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2004.
- [4] Florian Dietsch. Untersuchung des Einflusses lagenvariabler Schäftungswinkel auf die Verbindungsfestigkeit geklebter Faserverbundreparaturen. Master's thesis, Technische Universität Darmstadt, 2014.
- [5] European Cooperation for Space Standardization. *Space engineering - Adhesive bonding handbook*.
- [6] Alex B. Harmann and Chun H. Wang. Improved design methods for scarf repairs to highly strained composite aircraft structure. Technical report, Defence Science and Technology Organisation, 2006.
- [7] Hexcel Composites. *Composite Repair*, 1999.
- [8] Dirk Holzhüter and Alexander Pototzky. *Adaptive, Tolerant and Efficient Composite Structures Research Topics in Aerospace*, chapter Automated Scarfing Prozess for Bonded Composite Repairs, pages 297–307. Springer, 2013.
- [9] Reiner Kickert and Peter Horst. Faserverbundwerkstoffe - Leichtbau V. Technical report, TU Braunschweig, Institut für Flugzeugbau und Leichtbau, 2013.
- [10] Christian Sauer. Lufthansa Perspective on Applications and Field Experiences for Composite Airframe Structures, 2007.
- [11] United States Department of Defense. *Composite Materials Handbook*, 2002.
- [12] Chun. H. Wang and Andrew J. Gunnion. Design Methodology for Scarf Repair Composite Structures. Technical report, Australian Government - Department of Defense, 2006.
- [13] Chun H. Wang and Andrew J. Gunnion. Optimum Shapes for Minimising Bond Stress in Scarf Repairs. In *5th Australasian Congress on Applied Mechanics*, 2007.
- [14] Andreas Wilken. Einfluss von Umgebungsbedingungen auf die Festigkeit geklebter lagenvariabler Schäftverbindungen. Master's thesis, Technische Universität Braunschweig, 2014.

[15] Dominik Winter. Entwicklung eines reproduzierbaren Fügeverfahrens zur Herstellung von Prüfkörpern der Norm AECMA EN6066. Master's thesis, Technische Universität Braunschweig, 2015.

[16] Markus Zogg. *Faserverstärkte Kunststoffe*, chapter Verbindungstechnologien für FVK. ETH Zürich, 2010.

## Anhang